



# Variation de l'intensité du champ magnétique en France durant les deux derniers millénaires

Yannick Garcia

## ► To cite this version:

Yannick Garcia. Variation de l'intensité du champ magnétique en France durant les deux derniers millénaires. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Rennes 1, 1996. Français. NNT: . tel-00648642

**HAL Id: tel-00648642**

**<https://theses.hal.science/tel-00648642>**

Submitted on 6 Dec 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Y. GARCIA**

ISSN 1240-1498

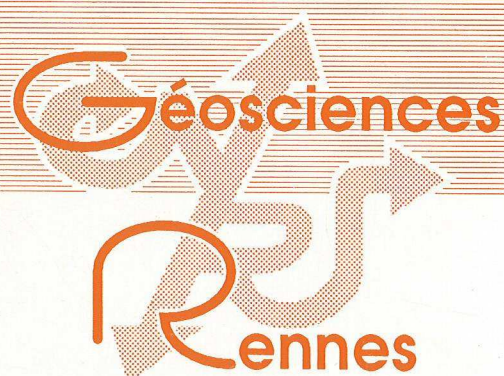
ISBN 2-905532-73-4

**variation de l'intensité  
du champ magnétique  
en France  
durant  
les deux derniers millénaires**

**MEMOIRES**

**1996**

**n° 74**



**ISSN : 1240-1498**

**ISBN : 2-905532-73-4**

**1996**

**GEOSCIENCES-RENNES**

**UPR-CNRS n°4661**

**Université de Rennes I - Campus de Beaulieu**

**F-35042-RENNES Cédex (France)**

**Yannick GARCIA**

**Variation de l'intensité du champ magnétique en France  
durant les deux derniers millénaires.**

**Mémoires de Géosciences Rennes, n° 74 331p.**





## Remerciements

Je tiens ici à remercier les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail,

ainsi que tous ceux sans lesquels il n'aurait pas été réalisé :

Mr le professeur Loïc Langouët qui a accepté d'être mon directeur de thèse et d'en présider le jury,

Annick Chauvin et Philippe Lanos qui ont toujours su répondre à mes questions et sont restés très patients,

les membres et étudiants du Laboratoire de Géomagnétisme du Parc Saint-Maur lesquels ont toujours été disponibles lors de mon séjour rue Neptune,

Fanette Laubenheimer, responsable scientifique de la fouille du site de Sallèles d'Aude, dont il sera souvent question ici, pour sa collaboration,

Pierrick Roperch, pour ses conseils, son oeil et sa mémoire infallible ...

Louis Goulpeau, mon tuteur de monitorat,

Mesdames Calza et LeSollic,

Mr Card, responsable du site de Chatigny, Luxeuil-les-bains, qui rentrant assez tard de fouille a accepté avec gentillesse de répondre à mes questions angoissées,

tous les personnels de Géosciences Rennes, pour leurs collaborations, analyses, scanner, et reliures à la dernière minute ...

tous mes amis des laboratoires de Géosciences, d'Archéométrie et Anthropologie,

et j'en oublie...

Enfin je tiens à remercier mes parents, qui savent pourquoi, et Véro à qui je dédie ce mémoire qui restera marqué dans la sienne ....



## Table des Matières

### *Introduction*

#### *Chapitre I : Rappel de quelques caractéristiques du champ magnétique terrestre et de la méthodologie de l'archéomagnétisme*

p7

##### I-1 Le champ magnétique terrestre

p9

##### I-2 méthodologie de l'archéomagnétisme de direction

p36

#### *Chapitre II: Méthodologie de l'archéointensité*

p59

##### II-1 Rappels sur la méthode de détermination de la paléointensité

p61

##### II-2 tests et choix d'une atmosphère de chauffe

p65

##### II-3 Anisotropie d'aimantation

p77

##### II-4 Etude des caractéristiques d'anisotropie d'ATR dans les terres Cuites

p95

##### II-5 Action de la vitesse de refroidissement sur l'acquisition d'ATR

p105

#### *Chapitre III: Etudes de l'archéointensité sur divers sites gallo-romains et "modernes", situés en France.*

p121

##### III-1 Introduction

p123

##### III-2 Le problème de la datation des lots.

p123

##### III-3 Caractéristiques des minéraux magnétiques

p130

##### III-4 Détermination des paléointensités

p150

##### III-5 Analyse des valeurs d'intensité

p163

##### III-6 Conclusion

p166

#### *Chapitre IV: Etude d'Archéointensité sur le site de Sallèles-d'Aude*

p169

##### IV-1 Introduction

p171

##### IV-2 Caractéristiques des fours et lot d'amphore

p172

##### IV-3 Etude des caractéristiques magnétiques

p181

##### IV-4 Détermination des paléointensités

p196

##### IV-5 Résultats et commentaires

p199

##### IV-6 Interprétation des caractéristiques magnétiques enregistrées par les fours de Sallèles

p212

##### IV-7 Conclusion

p215

#### *Chapitre V: Variation séculaire de l'intensité en Europe de l'Ouest durant les deux derniers millénaires*

p217

##### V-1 Etat des connaissances de la variation de l'intensité

p219

##### V-2 Variation de l'intensité en fonction de la latitude

p220

##### V-3 Compilation Européenne

p229

##### V-4 Pondération des données

p230

##### V-5 Interprétation sommaire des couples intensité-âges

p241

V-6 Traitement par Spline Cubique	p246
V-7 Variation de l'inclinaison et de la déclinaison	p253
V-8 Variation de la déclinaison	p263
V-9 Utilisation des SC pour l'élaboration d'une courbe de variation séculaire de l'intensité	p263
V-10 Conclusion sur les comparaisons des courbes de déclinaison, inclinaison et intensité	p274
V-11 Conclusion sur les variations de l'intensité	p274
 <i>Résumé et conclusion</i>	 p277
 <i>Références bibliographiques</i>	 p279
 <i>Annexe chapitre II</i>	 p285
<i>Annexe chapitre III</i>	p301
<i>Annexe chapitre IV</i>	p331

## INTRODUCTION

L'Archéomagnétisme, c'est à dire l'étude de l'aimantation rémanente des terres cuites, est une discipline qui apporte des données précieuses sur l'évolution du champ magnétique terrestre dans un passé assez récent et de plus, à travers l'utilisation de courbe de référence, peut s'avérer être un outil de datation du matériel archéologique.

Pour la datation, la direction moyenne (Déclinaison, Inclinaison) obtenue sur le lot étudié est comparée aux courbes de référence des variations directionnelles du champ magnétique.

Ces courbes sont relativement bien établies notamment pour la France, toutefois il n'en demeure pas moins que pour certaines périodes leur utilisation ne conduit pas à une solution unique de datation du matériel étudié.

Les données directionnelles ne suffisant pas toujours, il paraît intéressant d'essayer d'utiliser les variations de l'intensité du champ comme facteur discriminant.

La première étape à franchir est bien sûr d'établir une courbe de référence de la variation séculaire de l'intensité. Pour la France, très peu de données sont actuellement disponibles, et nous avons donc cherché à en acquérir de nouvelles, aussi précises que possible.

Dans ce mémoire, après un rappel des propriétés essentielles du champ magnétique terrestre et de la méthode de l'archéomagnétisme de direction (chapitre I), nous présentons au chapitre II, la méthode utilisée pour la recherche de la paléointensité.

Au chapitre III nous exposons l'étude réalisée d'une dizaine de lots d'échantillons. La finalité de cette étude étant de connaître la valeur de l'intensité du CMT en France pour la période gallo-romaine ainsi que lors de quelques âges particuliers.

Dans le chapitre IV, nous traitons du cas particulier des fours du site archéologique de Sallèles d'Aude. Ce vaste atelier de potiers regroupe une quinzaine de fours dont nous cherchons à établir la chronologie. L'archéointensité a été utilisée ici afin de tester ses capacités dans la résolution des problèmes de solutions de datation multiples de l'archéomagnétisme de direction.

Enfin dans le chapitre V, nous présentons une compilation des données d'archéointensité sur l'Europe de l'Ouest et sur l'Europe Centrale. La finalité étant de tenter d'établir une courbe de variation séculaire de l'intensité sur les deux derniers millénaires en Europe.





## **Chapitre I**

### **Rappel de quelques caractéristiques du champ magnétique terrestre et de la méthodologie de l'archéomagnétisme**

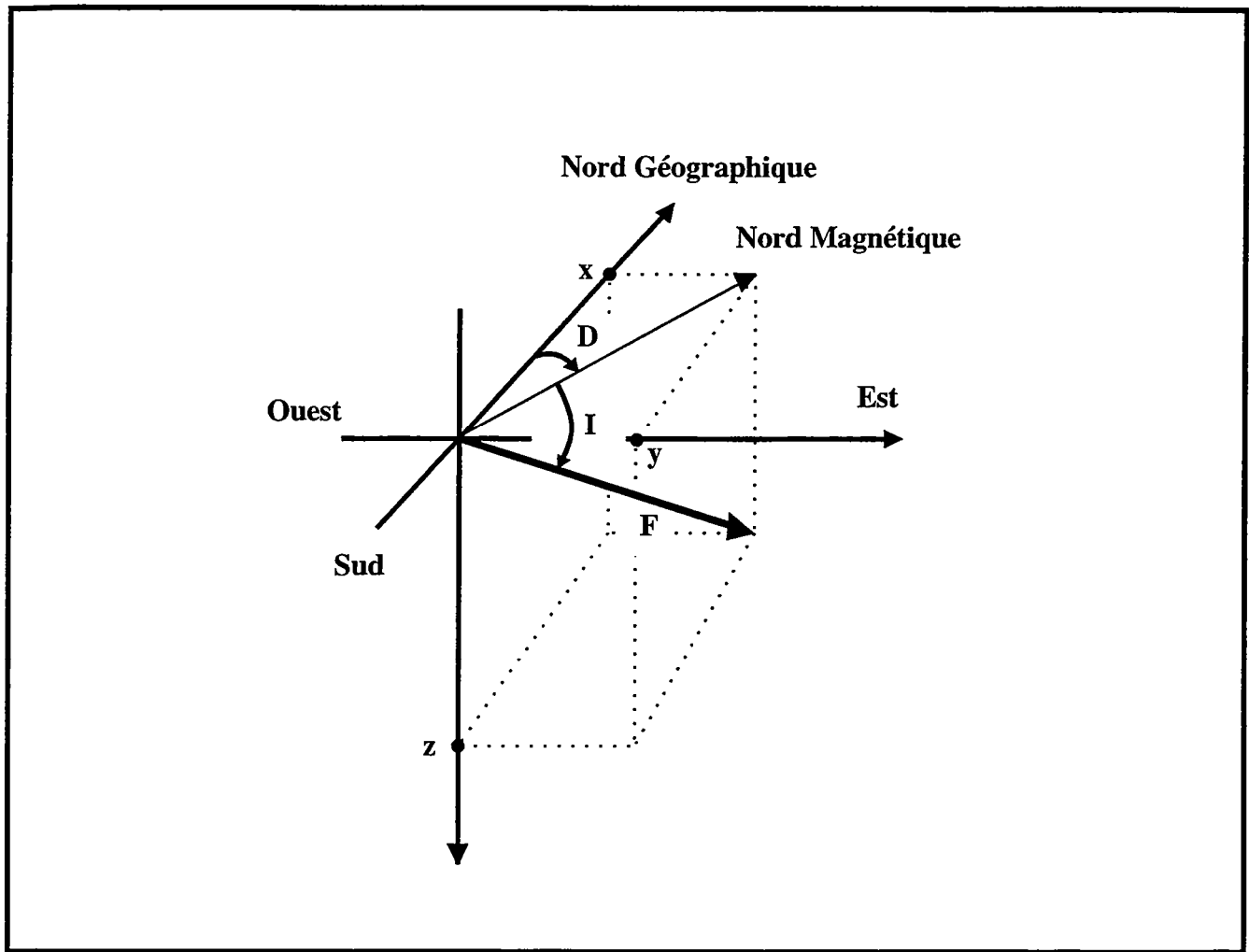


fig. I-1 : décomposition des directions du Champ Magnétique Terrestre.  $F$ , intensité du champ magnétique,  $I$ , inclinaison magnétique,  $D$ , déclinaison magnétique.  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont les composantes de  $F$  dans le repère  $Oxyz$ .

## **I Rappel de quelques caractéristiques du champ magnétique terrestre et de la méthodologie de l'archéomagnétisme.**

### **I-1 Le champ magnétique terrestre**

En tout point de la surface du globe, la présence du Champ Magnétique Terrestre (CMT) peut être visualisée à l'aide d'une aiguille aimantée. Libre de rotation horizontale ou verticale, celle-ci s'oriente tangentiellement aux lignes de champ magnétique.

L'angle entre l'horizontale du point de mesure et l'axe de l'aiguille dirigé vers le NM est appelé Inclinaison (notée  $I$ ). Par convention cette valeur est comptée positivement dans l'hémisphère nord. Ainsi l'inclinaison est de  $90^\circ$  au Pôle Nord Magnétique (PNM),  $0^\circ$  sur l'équateur magnétique (proche de l'équateur géographique), et atteint  $-90^\circ$  au Pôle Sud Magnétique (PSM). En 1990 elle était de  $63^\circ 40'$  à l'observatoire magnétique de Chambon-la-Forêt.

Le décalage angulaire entre le PNM (projection sur l'horizontale du vecteur champ) et le Pôle Nord Géographique (PNG, extrémité nord de l'axe de rotation terrestre) est appelé déclinaison (notée  $D$ ). En 1990, à Chambon-la-Forêt, la déclinaison était de  $-3^\circ$ , le PNM étant dirigé à l'ouest du PNG.

Inclinaison et Déclinaison sont, avec la variable Intensité, notée  $F$ , qui mesure l'induction du champ (environ  $47000 \text{ nT}$  à Chambon-la-Forêt en 1990), les trois composantes du CMT. Celles-ci sont variables et différentes d'un point à l'autre du globe. Les valeurs mesurées, par un observatoire magnétique par exemple, définissent donc les caractéristiques du CMT à cette latitude et longitude et, nous le développerons par la suite, à l'instant  $t$  donné.

Ces trois caractéristiques peuvent aussi être exprimées dans un repère cartésien Oxyz, relié aux directions cardinales du point où est effectuée la mesure. L'axe  $x$  est aligné sur le nord géographique, l'axe  $y$  sur l'est, et l'axe  $z$  sur la verticale du lieu, dirigé vers la Terre. Les composantes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ , qui décrivent le champ sont alors telles que (voir fig. I-1) :

$$X = \cos D \cdot \cos I \cdot F,$$

$$Y = \sin D \cdot \cos I \cdot F,$$

$$Z = \sin I \cdot F.$$

#### **I-1-1 Répartition du CMT actuel à la surface du globe**

La répartition géographique du CMT à la surface de la Terre est connue pour la période actuelle grâce à l'utilisation des observatoires terrestres, marins ou satellites. L'utilisation de ces données nous permet de tracer des cartes magnétiques où nous pouvons observer les diverses configurations du champ.

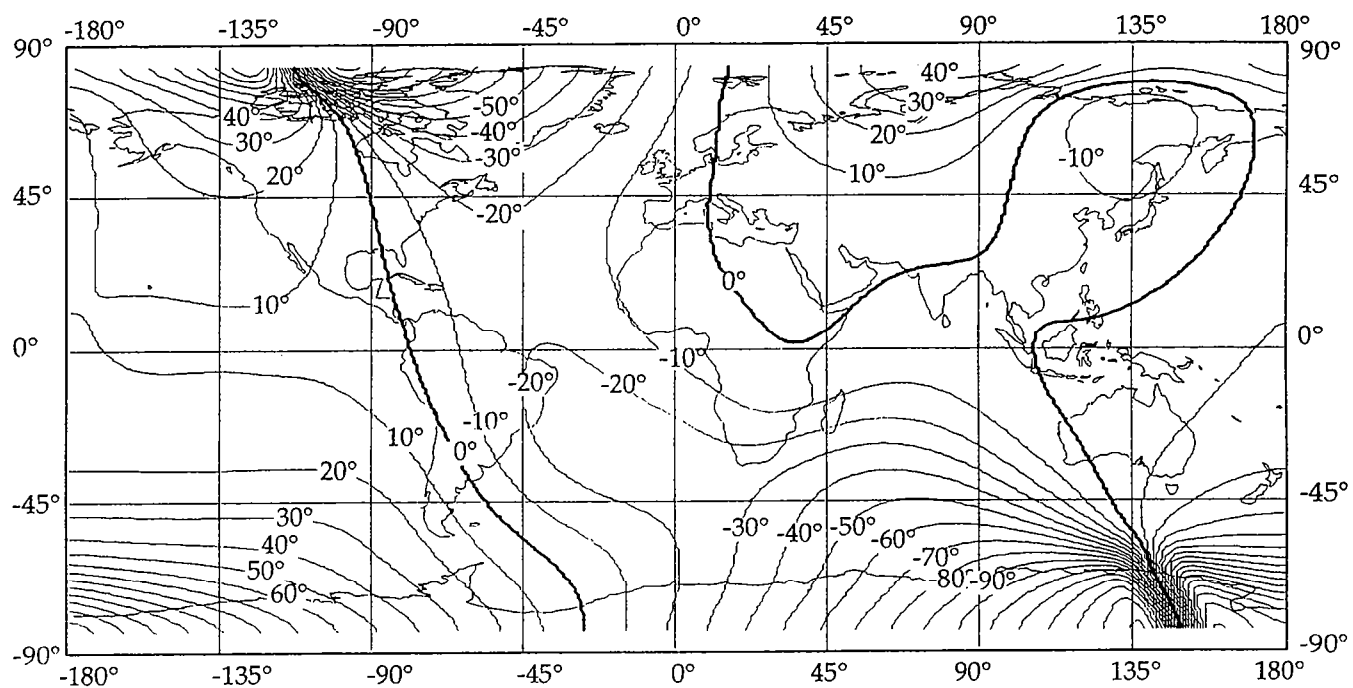


fig. I-2-a : modèle IGRF 1995.0, répartition à l'échelle du globe des courbes isogones.

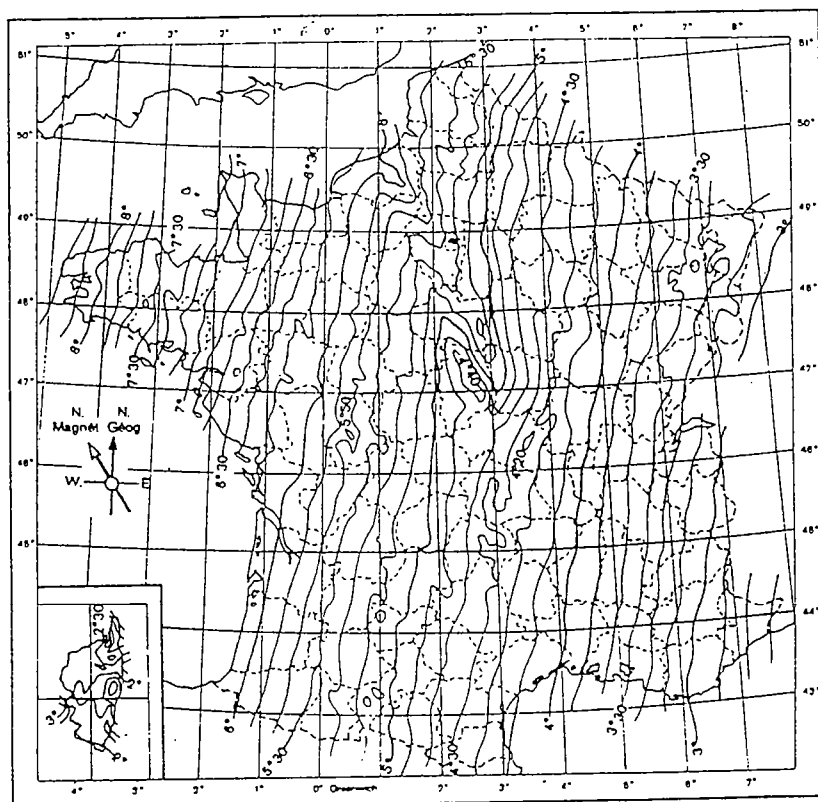


fig. I-2-b : France, relevé des lignes d'isogones, janvier 1970.



La carte mondiale des isogones (en fait une reconstitution référencée modèle IGRF 1995.0, fig. I-2-a), nous montre la disposition des courbes de valeurs identiques de déclinaison. Deux pôles magnétiques principaux s'en dégagent, décalés des pôles géographiques, un situé au nord du Canada, le second situé au sud de l'Australie, en Antarctique. Pour une fenêtre plus réduite d'observation, l'Europe, qui nous intéresse directement, nous remarquons que les isogones sont disposés quasi parallèles au méridien, figure particulièrement visible sur le relevé établi pour la France en 1970 (fig. I-2-b).

La répartition des isoclines, lignes de valeurs d'égale inclinaison, (modèle IGRF 1995.0, fig. I-3) confirme la présence des deux pôles observés par les courbes d'isogones. L'équateur magnétique suit de façon plus ou moins rapprochée l'équateur géographique. Il est plus au sud dans le Pacifique et l'Amérique du Sud, et plus au nord sur le reste de la circonférence. Dans le secteur de l'Europe de l'Ouest les isoclines apparaissent parallèles entre elles et avec les parallèles géographiques.

On note sur la carte des isogames, lignes de valeurs identiques d'intensité, la présence de deux maxima dans l'hémisphère nord, un centré sur le nord Canada, le second sur le nord de l'Union Soviétique (fig. I-4-a, modèle IGRF 1995.0). Un seul maximum est visible dans l'hémisphère Sud, situé au sud de l'Australie Est. Ces maxima ont de fortes valeurs d'intensité, entre 60000 et 66000 nanoTesla (nT). Un seul minimum est présent sur cette carte, au sud du Brésil, d'intensité 24000 nT.

En France, les courbes d'isogames sont disposées parallèles les unes aux autres, avec une croissance d'intensité quasi régulière avec l'augmentation de la latitude (fig. I-4-b). Quelques anomalies sont toutefois bien visibles comme celle du Bassin de Paris.

En résumé, le champ mesuré à la surface de la Terre (ou modélisé à partir des mesures) apparaît comme en grande partie assimilable à celui développé par un dipôle magnétique. Ce dernier, vu la position des pôles magnétiques, serait centré par rapport au globe terrestre, mais légèrement décalé de l'axe de rotation, de  $11.5^\circ$  actuellement (fig. I-5).

Nous noterons qu'en Europe de l'Ouest le champ voit ses variables évoluer plus ou moins régulièrement avec la variation en latitude et longitude. Ainsi, en première approximation nous pouvons dire que les valeurs d'inclinaison, ou d'intensité, varient progressivement avec la latitude du point d'observation.

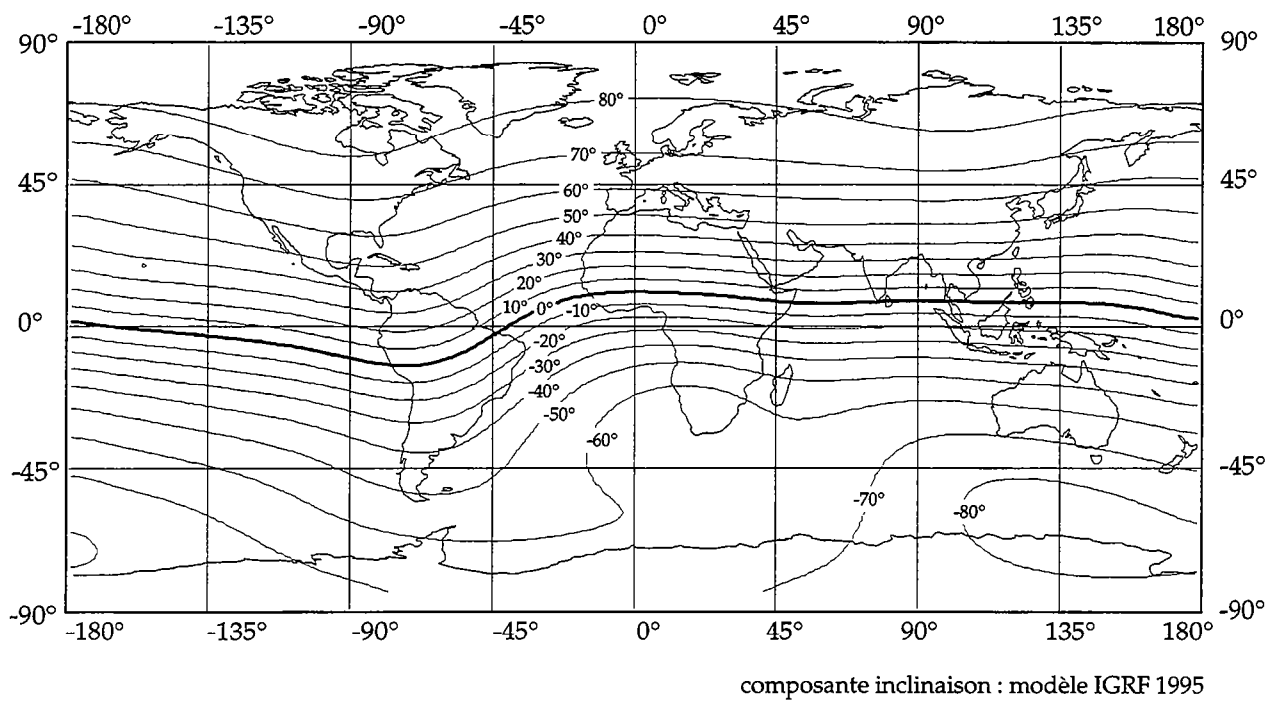


fig. I-3 : modèle IGRF 1995.0, répartition à l'échelle du globe des courbes isoclines.

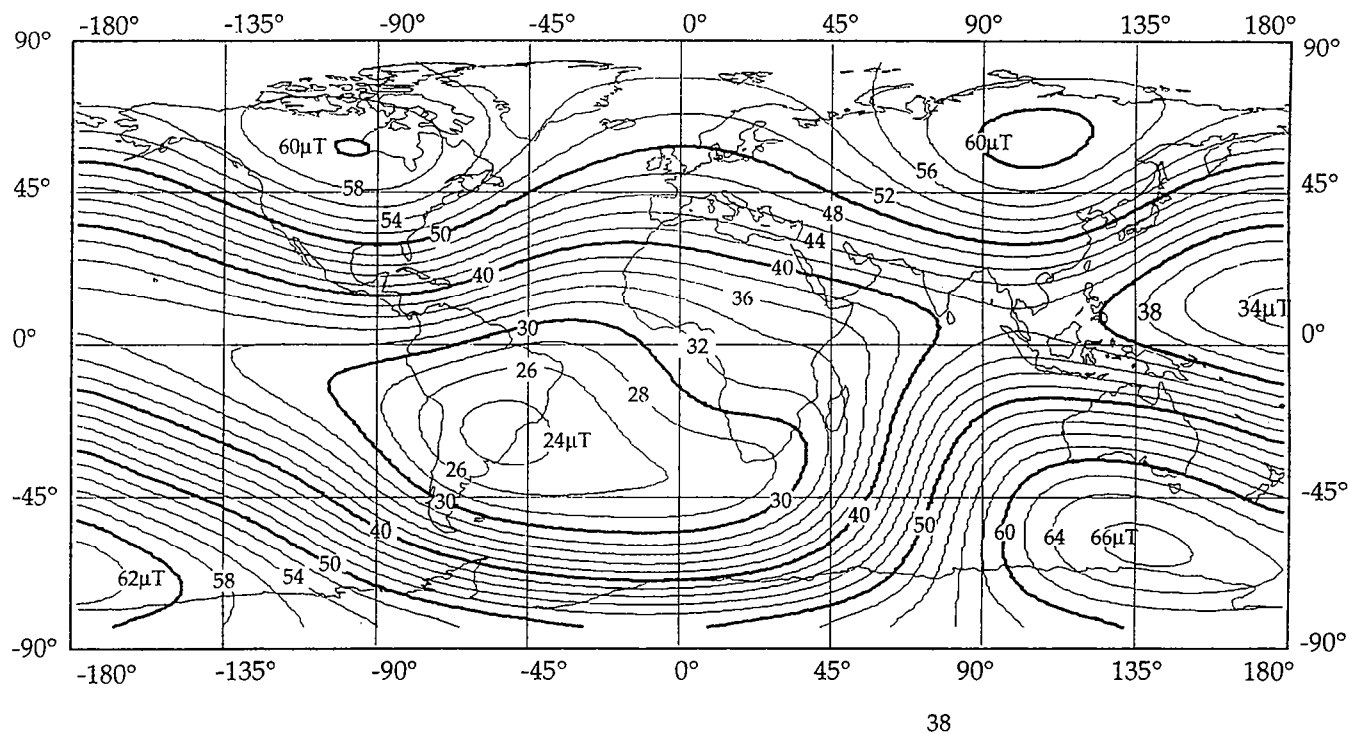


fig. I-4-a : modèle IGRF 1995.0, répartition à l'échelle du globe des courbes isogames.

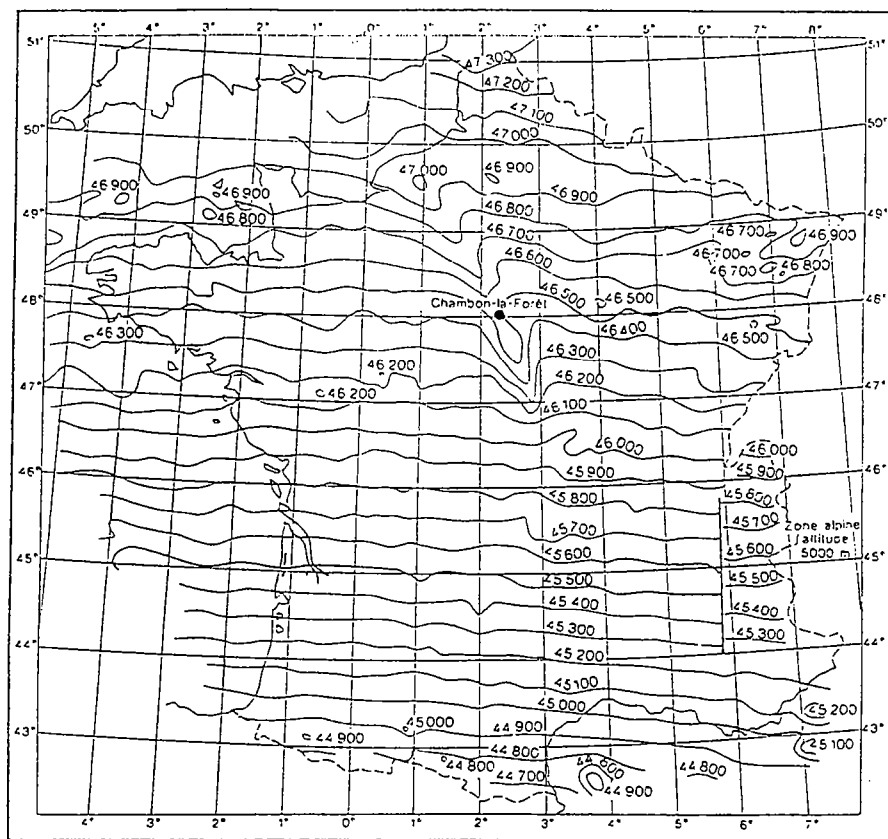


fig. I-4-b : France, relevé des lignes d'isogames, 1964.5.

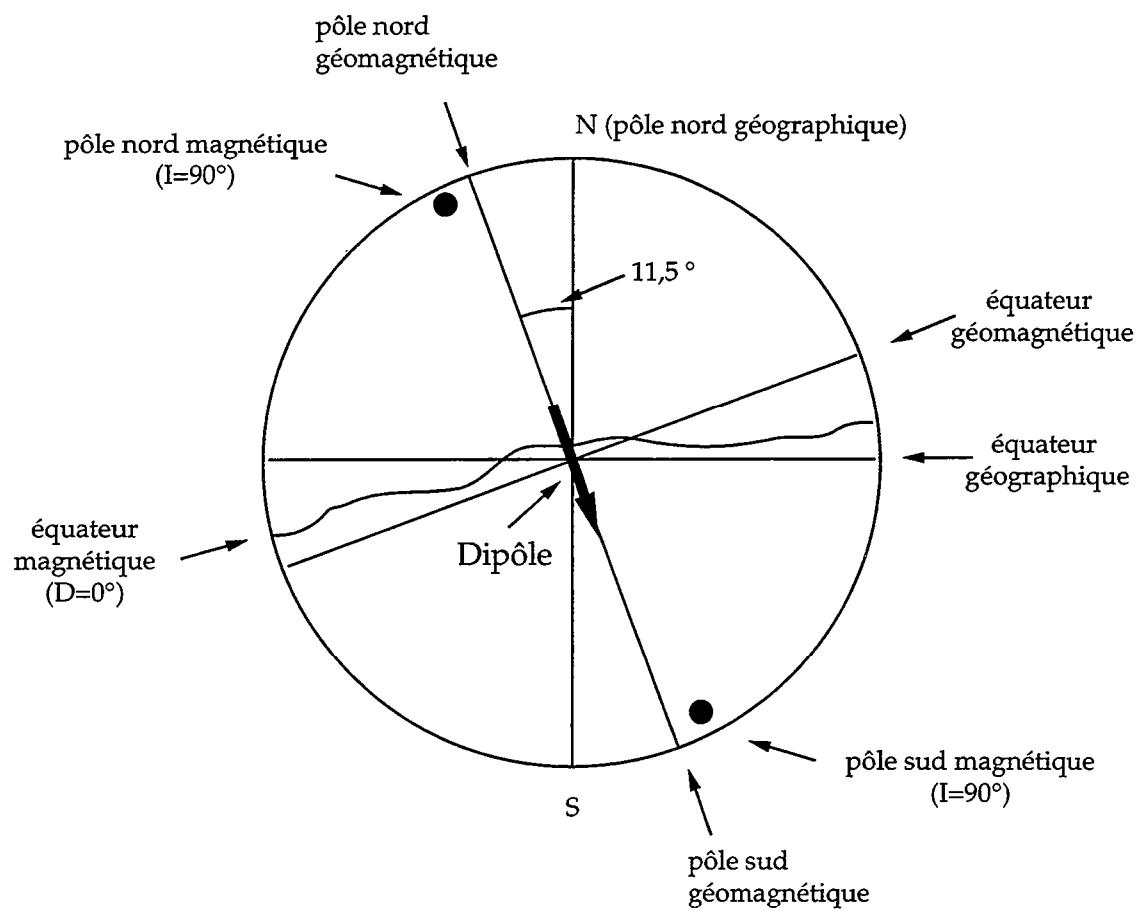


fig. I-5 : modèle de dipôle incliné, centré non axial. Ce modèle de dipôle est celui qui développerait le champ magnétique le plus apte à être assimilé à celui mesuré à la surface de la Terre (d'après Butler , 1992).

## I-1-2 Variation du Champ dans le temps et dans l'espace

### Premières observations

La notion de variation du CMT est relativement ancienne puisque dès 1634 Gellibrand note que la valeur de la déclinaison, à Londres, a varié de  $7^\circ$  par rapport à la valeur mesurée en 1580.

Puis, à la fin du XVII<sup>e</sup> s., Edmund Halley rend compte des premières observations de dérive vers l'ouest des lignes isogones dans l'Atlantique.

A ces variations lentes, dites séculaires, s'ajoutent rapidement des observations de variations plus rapides, dans la journée (Graham en 1722), voire durant un mois (Hiorter) ou bien saisonnières, dites annuelles (Canton en 1759).

Peu à peu un lien est créé entre la durée des variations et leurs origines. Ainsi en 1741 la relation est faite entre les orages magnétiques, qui induisent des variations de quelques nT, et les aurores boréales (Hiorter, Celsius). Plus tard, dans les années 1850, l'influence du cycle d'apparition des taches solaires (période de 11 ans), est mise en évidence.

En 1838, Gauss utilise un outil mathématique, l'analyse en harmoniques sphériques (que nous développons par la suite), qu'il applique au champ magnétique à la surface du globe. Ce calcul lui permet de déduire que le champ, mesuré à la surface de la Terre, résulte de la somme d'un champ d'origine interne à la Terre, le champ magnétique terrestre (CMT), et d'un champ qui par opposition est d'origine externe. Des deux, le CMT est le plus important car il représente 99% du champ total mesuré.

Les possibilités offertes par cette analyse sont importantes parce qu'elle va permettre de discuter de l'origine, interne ou non, des différentes variations observées.

### Analyse en harmoniques sphériques du champ.

L'analyse réalisée par Gauss repose sur la démarche suivante (Merril & Mc Elhinny, 1983, Hulot, 1992) :

- le champ magnétique mesuré à la surface de la Terre peut être assimilé à celui dérivant d'un potentiel géomagnétique  $V$ . Il est possible d'en pratiquer l'analyse grâce à l'utilisation d'harmoniques sphériques et des variables de coordonnées sphériques colatitude ( $\theta$ ), longitude ( $\phi$ ) et rayon ( $r$ ).

- si  $a$  est le rayon de la Terre, assimilé à 6371 km, et  $r$  un rayon en dessus duquel aucune source n'est présente, alors le potentiel  $V$  peut être exprimé comme la somme d'un potentiel engendré par des sources internes (lorsque  $r < a$ ) et des sources externes ( $r > a$ ) :



$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ g_n^m (1 - C_n^m) Y_n^{mc}(\theta, \phi) + h_n^m (1 - S_n^m) Y_n^{ms}(\theta, \phi) \right\} \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \\ + a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ g_n^m C_n^m Y_n^{mc}(\theta, \phi) + h_n^m S_n^m Y_n^{ms}(\theta, \phi) \right\} \left( \frac{r}{a} \right)^n \quad f. I-1$$

$g_n^m$ ,  $h_n^m$  sont les coefficients de Gauss associés aux polynômes de Legendre  $P_n^m$ ,

$C_n^m$  et  $S_n^m$  sont compris entre 0 et 1 et représentent la fraction de potentiel associée aux sources externes ( $r > a$ ), alors que  $(1 - C_n^m)$  et  $(1 - S_n^m)$  représentent la fraction associée aux sources internes ( $r < a$ ).

$Y_n^{mc}(\theta, \phi)$  et  $Y_n^{ms}(\theta, \phi)$ , sont les harmoniques élémentaires de degré  $n$  et ordre  $m$ .

$Y_n^{mc}(\theta, \phi) = P_n^m \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(m\phi)$  et  $Y_n^{ms}(\theta, \phi) = P_n^m \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(m\phi)$ .

La détermination des valeurs des coefficients de Gauss, exprimés en nT, est effectuée à partir des mesures directes, ou parfois à partir de valeurs moyennes sur plusieurs années.

Les relations entre mesure *in-situ*, du champ magnétique, et le potentiel du champ sont les suivantes :

$$X = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \\ Y = -\frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \\ Z = \frac{\partial V}{\partial r}$$

Si les valeurs utilisées sont des moyennes calculées sur plusieurs années, alors la contribution du champ externe est quasi nulle. Il est ainsi possible de faire abstraction de celle-ci et de se concentrer sur l'analyse du champ d'origine interne.

Au terme  $g_1^0$  correspond un potentiel développé par un dipôle géocentrique, disposé le long de l'axe Z, direction positive. Dans le globe, ce dipôle serait donc axial, et centré sur l'axe de rotation terrestre, pointant vers le sud géographique.

Le terme  $g_1^1$  est celui d'un dipôle centré, orienté selon l'axe X, dans le plan de l'équateur, pointant vers la longitude 0.

Le terme  $h_1^1$  pointe lui selon l'axe Y, il est donc inclus dans le plan équatorial, mais dirigé plein est.

La somme des trois premiers termes de Gauss, permet de reconstituer un dipôle d géocentré, incliné de 11.5° par rapport à l'axe de rotation. Un tel dipôle développe un champ magnétique auquel nous pouvons assimiler une grande partie (90%) du champ magnétique terrestre. Cette partie est donc appelée champ dipolaire et les trois termes  $(g_1^0 + g_1^1 + h_1^1)$  sont réunis et associés comme étant ceux générant ce champ dipolaire.

La valeur calculée du moment dipolaire actuel,  $m = \frac{4\pi a^3}{\mu_0} \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}$ , est estimée à  $8 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ .

Par opposition à la notion de champ dipolaire, les autres termes sont regroupés afin de rendre compte des 10% de CMT restant, et représentent le champ non-dipolaire.

Le champ total terrestre,  $B(t)$ , peut donc se décomposer comme la somme de deux termes  $B_d(t)$  et  $B_n(t)$ ,  $B_d(t)$  représentant un champ dérivé d'un dipôle centré, et  $B_n(t)$  la contribution non dipolaire au champ total.

Les modèles IGRF présentés précédemment ont été reconstitués à partir des coefficients de Gauss calculés sur cinq années consécutives (le modèle porte le nom de l'année finale). Les reconstitutions ont été construites en utilisant des coefficients définis jusqu'au degré 10.

## Analyse des variations du champ magnétique

Les variations du champ magnétique dans le passé sont étudiées afin de connaître son histoire, et tenter de comprendre son origine.

Nous disposons depuis les années 1830 des premiers enregistrements continus. Ceux-ci ont d'abord surtout concerné l'hémisphère nord. Actuellement la couverture au sol est meilleure et l'emploi de satellites, même s'ils sont plus sensibles aux phénomènes d'origine externe, permet d'assurer une surveillance sur tout le globe.

Pour reconstituer les divers états du champ dans le passé plus lointain nous aurons recours à l'archéomagnétisme et au paléomagnétisme.

Ces deux méthodes utilisent des techniques identiques appliquées à des matériaux d'âges différents. L'archéomagnétisme étudie des objets d'âges historiques ou préhistoriques (terres cuites ou roches), le paléomagnétisme a la charge d'étudier le comportement du CMT au cours des temps géologiques. Les roches magmatiques permettent de connaître l'intensité  $F$  et les directions  $I$  et  $D$ , les roches sédimentaires apportent surtout des renseignements sur la variation des directions. Depuis quelques années elles permettent aussi d'établir des courbes de variation d'intensité relative.

Il est évident que plus la prospection est poussée dans le temps et plus la précision de la reconstitution diminue. Cette précision dépend des capacités des méthodes de datation, le second dépend des processus d'acquisition de l'aimantation (aimantation thermorémanente, ATR, ou aimantation d'origine détritique, ARD) et des facteurs géologiques qui les contrôlent (par exemple les vitesses de dépôts pour les sédiments).

A ces problèmes se rajoute une mauvaise répartition géographique des sites étudiés.

## **A) Variation dans le temps : enregistrements directs**

A la lumière des travaux actuels nous allons voir que les variations de courte durée, de l'ordre de l'année, sont majoritairement reliées à des phénomènes agissant sur le champ externe. A l'inverse les variations de basse fréquence sont attribuées à des événements situés à l'intérieur du globe.

Mais la limite n'est pas aussi nettement tranchée qu'il le paraît puisque l'existence de signaux de courte durée, mais d'origine profonde, comme le "jerk", est maintenant bien établie, et qu'à l'opposé la période de 11 ans, observée sur les enregistrements, est associée à un cycle solaire.

## **Les variations d'origine externe**

Ces variations sont essentiellement provoquées par l'activité solaire. Elles se traduisent soit par une interaction entre vents solaires et magnétosphère (se manifestant entre autres sous la forme des aurores boréales), ou encore par ionisation de la haute atmosphère, dans l'ionosphère. Ces variations atteignent de très faibles amplitudes, au maximum d'une centaine de nT :

- celles-ci peuvent se présenter sur les magnétogrammes comme des perturbations de très courte durée, quelques minutes à quelques heures, et sont alors qualifiées de "variation d'agitation";
- des variations de période 24 heures sont aussi observées, reliées à la période de rotation de la Terre;
- les variations de période 26 jours environ, qui se manifestent par des orages magnétiques, sont elles reliées au cycle de rotation solaire. Ce sont là, semble-t-il, les périodes de plus forte intensité de perturbation d'origine externe;
- des périodes longues de 6 mois, ainsi que de durée d'un an, sont aussi notées et seraient liées à la variation de la position de la Terre par rapport au soleil.
- des périodes de 11 ans sont aussi mesurées, nous en avons déjà parlé, liées à la fréquence de maximum de concentration des taches solaires.

Enfin, des variations périodiques de 22 ans et 60 ans pourraient aussi exister. La première serait attribuable au double cycle solaire de 11 ans. La seconde n'est pas encore définitivement admise (Courtilot & Le Mouél, 1988).

Comme nous pouvons le noter, ces variations recouvrent une large gamme de fréquences, mais elles sont de durée relativement courte à l'échelle des temps géologiques. La détermination des périodes n'est pas encore définitive, entre autres du fait que des variations de grande longueur d'onde pourraient exister mais seraient masquées par les variations d'origine interne, ou variation séculaire, dont, nous allons le voir, les périodes sont en effet plutôt de longues durées.

### **Les variations d'origine interne : variation rapide**

Le "Jerk" apparaît comme un cas dans les variations d'origine interne. En effet ce signal, nettement mis en évidence sur les enregistrements magnétiques durant l'année 1969, est caractérisé par une variation rapide, de durée inférieure à un an (fig. I-6).

Il se manifeste par un changement brutal de la pente de la courbe de variation séculaire. L'origine interne de cet événement semble maintenant bien attesté (Courtillot & Valet, 1995). Un tel phénomène a tout d'abord été remarqué au cours de l'année 1969, référencé 1969.5. Un travail récent (Alexandrescu & al., 1995) d'analyse par ondelettes sur la composante Y, la moins sensible aux effets d'origine externe, a permis de confirmer la présence de tels signaux en 1901, 1913, 1925, 1969 et 1978, ainsi que leur origine interne.

### **Les variations d'origine interne : variation séculaire**

Le but des travaux d'analyse de la variation séculaire est de dégager la contribution propre à chaque terme, champ dipolaire et non-dipolaire, en mettant en évidence les variations de direction et intensité de ces différentes composantes.

Nous rappelons les observations d'Edmund Halley, au XVII<sup>e</sup> siècle, qui rendait compte d'une dérive vers l'ouest des lignes de valeurs égales de déclinaison.

D'après les mesures directes nous savons que la déclinaison a varié à Paris entre 5° est vers 1600 ap. J.C., et ≈22° ouest vers 1820. L'inclinaison a varié de 75°, vers 1670, à 63.5° environ, observés actuellement.

Durant ces derniers 150 ans c'est la partie CND qui semble avoir le plus évoluée. La comparaison des cartes de la composante verticale du CND (fig. I-7a et I-7b) permet de visualiser une dérive des zones de maxima et minima vers l'Ouest. Cette variation géographique peut être accompagnée d'une variation positive ou négative de l'intensité. On notera toutefois que certaines zones sont restées fixes comme en Mongolie par exemple.

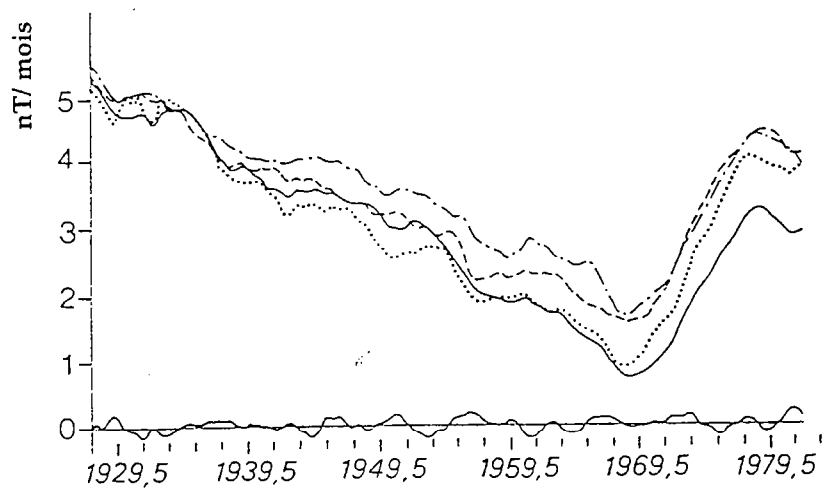


fig. I-6 : variation séculaire de la composante Y du CMT observée en Europe. Le "jerk" se manifeste par le changement brutal de la tendance de la variation en 1969.5 (Jault & Le Mouél, 1994).



La vitesse de dérive, calculée à partir des modèles de 1907 et 1945, atteindrait  $0.18^\circ$  par an (Bullard & al., 1950). Cette valeur ne serait en fait qu'une valeur moyenne. En effet certaines zones peuvent atteindre des vitesses de  $0.3^\circ$  par an. La différence entre cette dernière valeur et la première proviendrait de la prise en compte des zones statiques dans le calcul de dérive moyenne (Yukutake, 1979).

Ce déplacement semble actuellement surtout visible dans l'hémisphère atlantique (Gubbins & Bloxham 1987), mais ne serait absent du Pacifique que récemment (Yukutake, 1993).

Nous avons aussi une idée de la variation du champ dipolaire. Depuis 1835 l'intensité de ce dernier a décliné de 5%. Si ce phénomène persistait le champ dipolaire pourrait s'inverser dans 2000 ans (fig. I-8).

La variation angulaire de l'axe dipolaire est faible. La dérive, mesurée elle aussi vers l'ouest, s'effectue avec une vitesse de l'ordre de  $0.05^\circ$  par an (fig. I-9). En utilisant les premières mesures de déclinaison et inclinaison, et en extrapolant sur la valeur de l'intensité, Barraclough (1974) présente un dipôle dérivant vers l'ouest depuis 1600 ap. J.C., avec une vitesse de  $0.08^\circ$  par an, et une très faible variation de la latitude d'un taux de  $0.01^\circ$  par an.

Les travaux récents de Hulot (1992) et Hulot et Le Mouél (1994) permettent de présenter le CMT comme résultant d'un processus à deux échelles. Un dipôle de période importante, de l'ordre de 2000 ans (Courtillet & Valet, 1995) constitue la principale contribution au champ. A celle-ci vient se superposer une contribution non-dipolaire, de durée périodique beaucoup plus petite, 200 ans environ, générée par un champ multipolaire au comportement aléatoire. Ce serait elle qui serait à l'origine de la variation séculaire s.s.

Les auteurs notent néanmoins que pour être confirmé, un tel modèle aura besoin d'être confronté aux données acquises pour une échelle de temps plus importante, données fournies par l'archéomagnétisme et le paléomagnétisme.

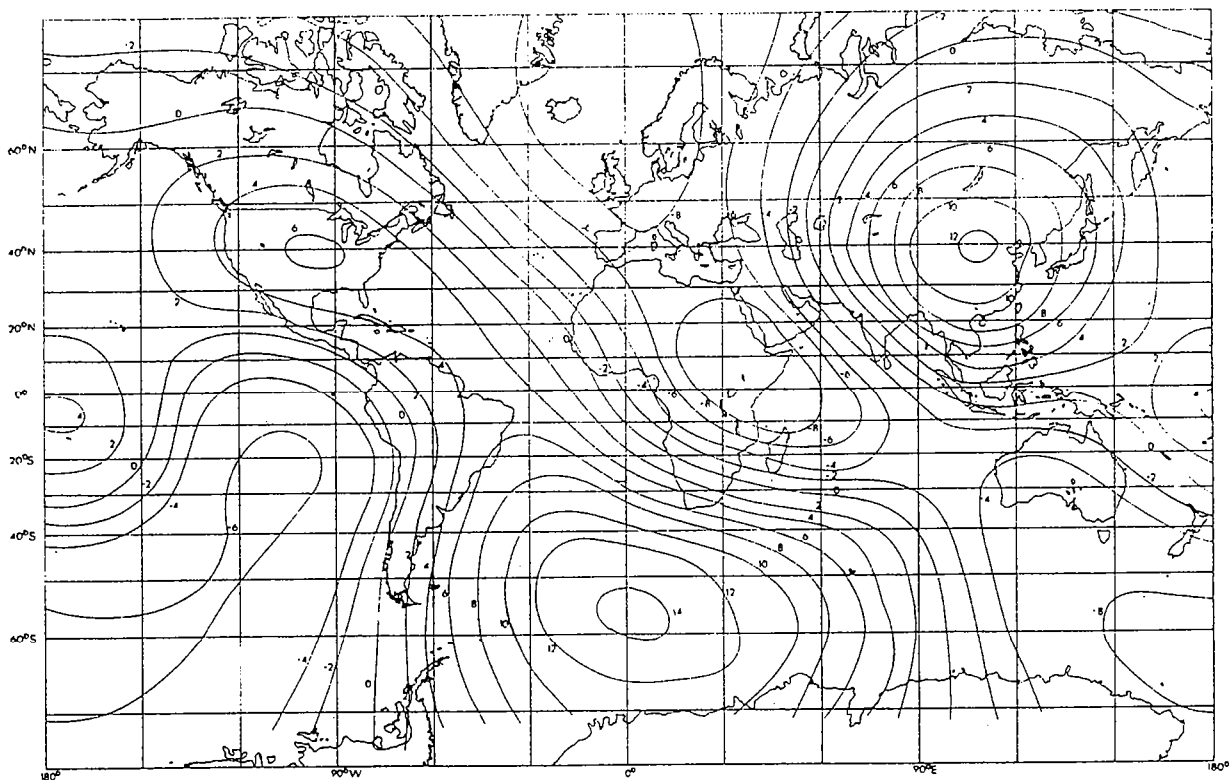


fig. I-7-a : courbes isogames de la composante verticale du CND mondial en 1929 (Yukutake et Tachinaka, 1968)

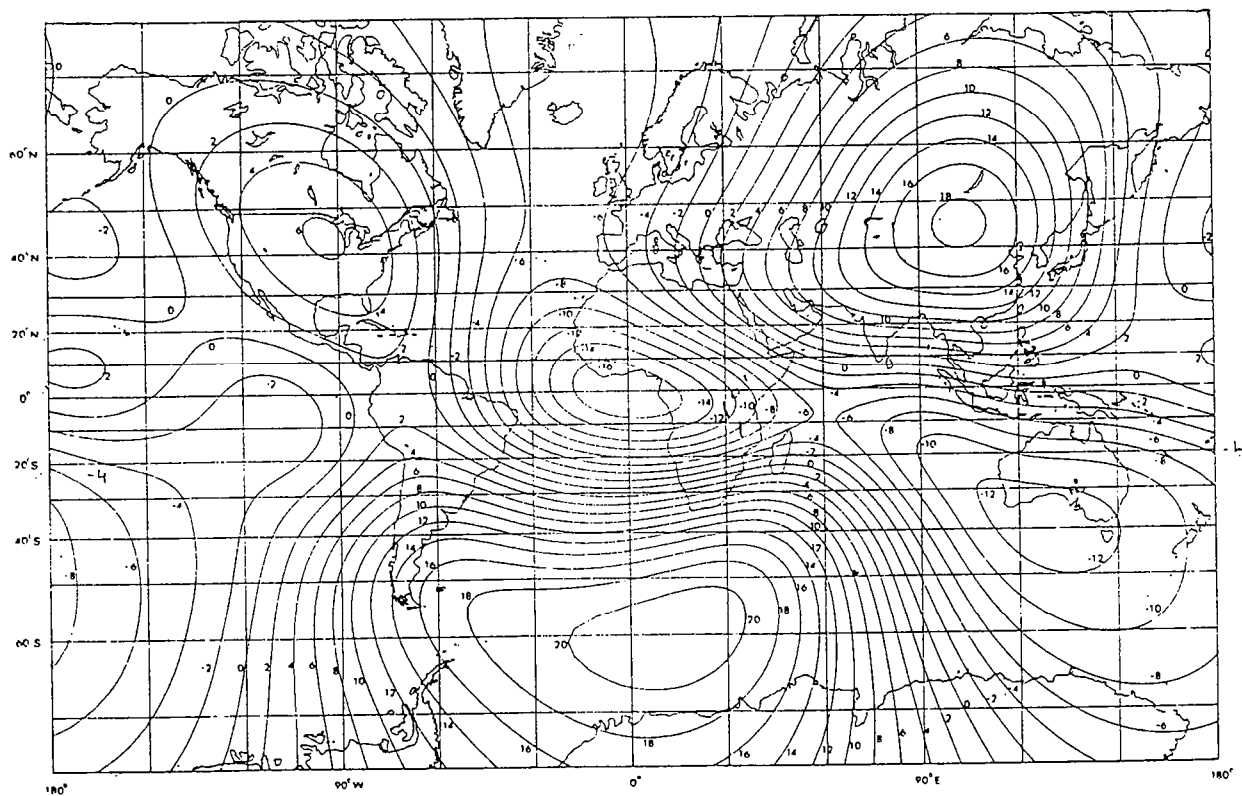


fig. I-7-b : courbes isogames de la composante verticale du CND mondial en 1980 (Barracough, dans Merrill et Mc Elhinny 1983).

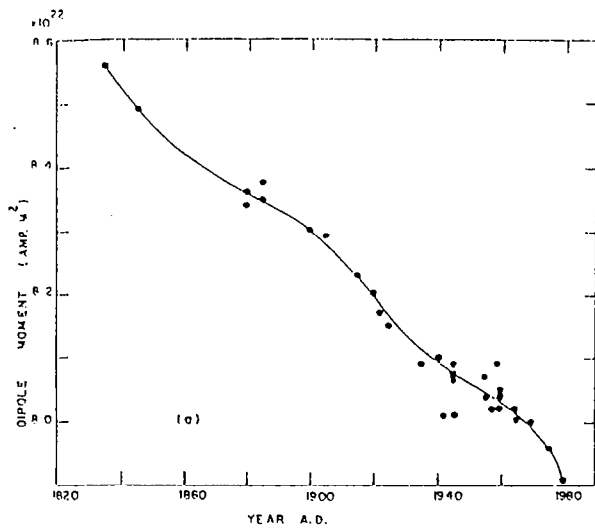


fig. I-8 : variation de l'intensité du champ dipolaire depuis 1838 (Barracough 1974).

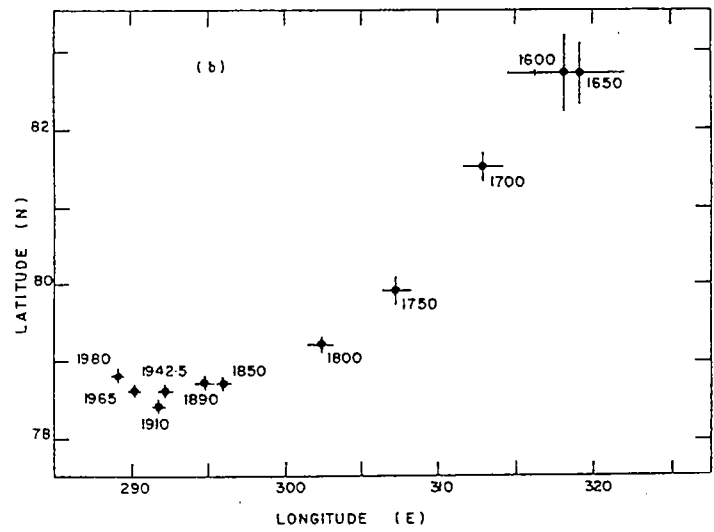


fig. I-9 : variation de l'axe du dipôle depuis 1600 (Barracough 1974).

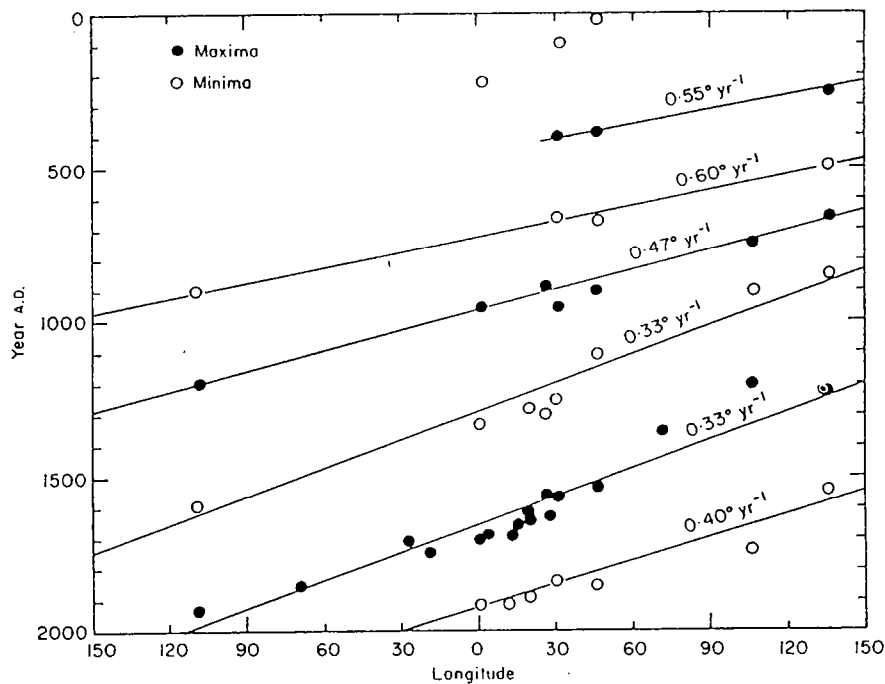


fig. I-10 : comparaison des maxima et minima des courbes de variation de l'inclinaison en fonction de la latitude de référence et de l'âge considéré (Travaux de Yukutake en fonction des connaissances de 1967).

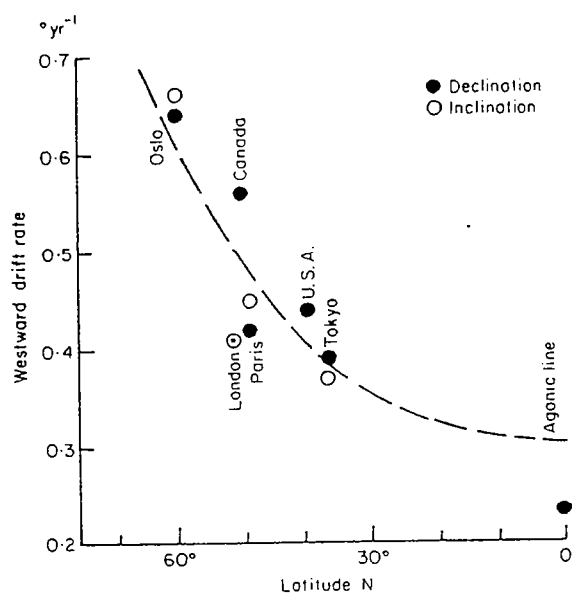


fig. I-11 : variation des taux de dérive (vers l'ouest) de l'inclinaison et déclinaison en fonction de la latitude (Yukutake 1967).

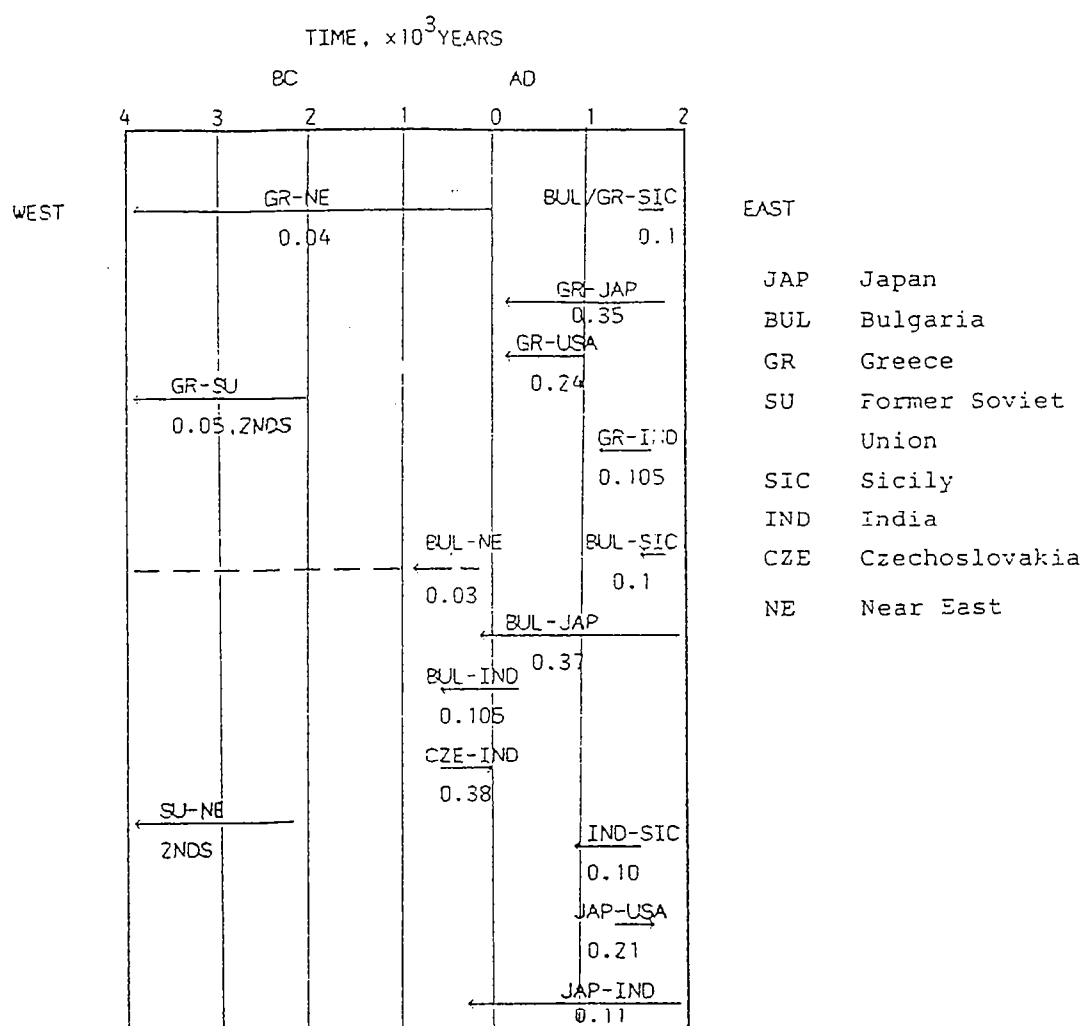


fig. I-12 : taux de dérive du CND calculés à partir de la comparaison des maxima et minima des courbes de variation de l'intensité (Lagios, Liritzis et Sotiropoulos, 1992).

## **B) Variation séculaire : données archéomagnétiques**

### **vitesse de dérive**

La comparaison des courbes de variation de l'inclinaison, pour l'Europe de l'Est et le Japon, permet de calculer une dérive vers l'ouest des maxima et minima, avec une vitesse de  $0.3^\circ$  de longitude par an, durant les derniers 1400 ans (Merrill & Mc Elhinny, 1983). L'illustration (fig. I-10) donnée par le travail de Yukutake et Tachinaka (1967), sur la déclinaison et l'inclinaison, est claire et permet de calculer un taux moyen de dérive ouest de  $0.38 \pm 0.06^\circ$  par an. Cette valeur, élevée, est à rapprocher des vitesses de dérive des zones de CND non statiques calculées à partir des mesures directes.

Toujours par ces travaux, la vitesse de dérive apparaît liée à la latitude du point d'observation. Ainsi pour une latitude nord de  $60^\circ$  elle serait de l'ordre de  $0.65^\circ$  par an et de l'ordre de  $0.4^\circ$  par an pour une latitude de  $\approx 35^\circ$  nord (fig. I-11).

En 1989, Aitken & al, étudient la variation de l'intensité durant les derniers 4000ans. Ils observent une grande variation de l'amplitude, accompagnée d'un décalage chronologique des pics d'intensité en fonction du déplacement vers l'ouest de la longitude d'observation (la courbe de référence, la plus achevée, est située en Grèce, les autres, moins complètes, proviennent surtout de la Chine et de l'ouest des USA). La variation du dipôle magnétique n'étant pas compatible à la présence de ces décalages, l'hypothèse de la contribution d'un CND (pressentie par Barton & al., en 1979) dérivant lentement vers l'ouest est émise. Les taux de dérives calculés (mais non précis du fait de la dispersion des points sur les courbes), varient entre  $0.1$  et  $1.4^\circ$  de longitude par an.

En 1992, Lagios, Liritzis et Sotiropoulos complètent ce travail en comparant les courbes de variation d'intensité de neuf pays, Japon, Bulgarie, Grèce, CEAI, Sicile, Inde, Tchécoslovaquie et Proche-Orient (fig. I-12). Ils observent sur les deux derniers millénaires des dérives vers l'ouest mais aussi vers l'est. Le taux moyen de dérive varie entre  $0.04$  et  $0.37^\circ$  de longitude/an, en accord avec les taux calculés par Bullard en 1950, ou Aitken & al, en 1989.

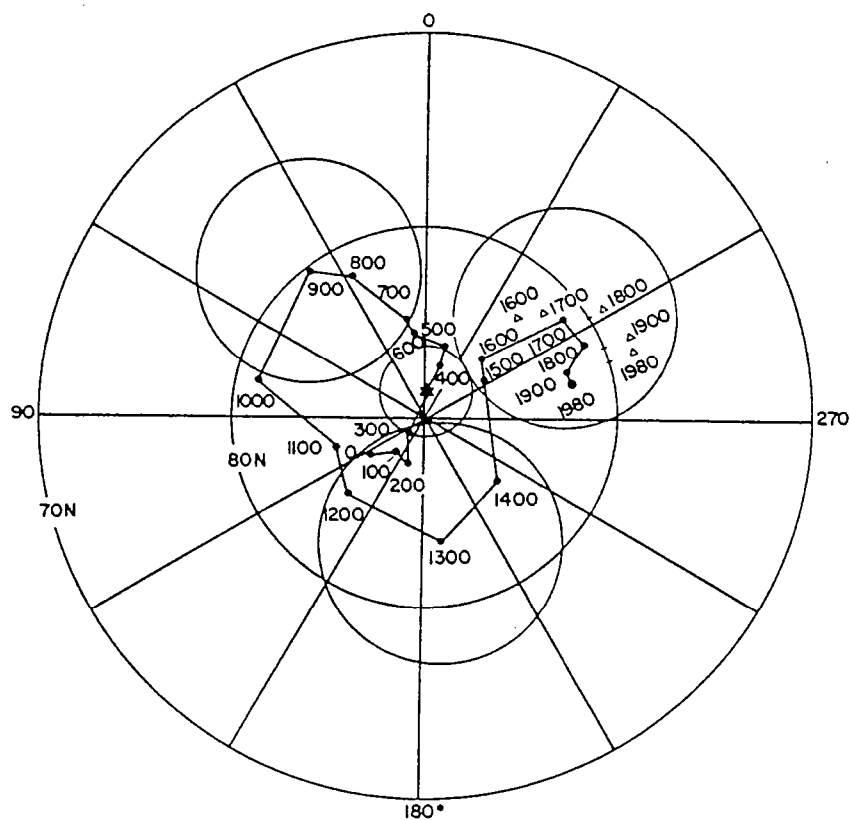
### **analyse des périodes**

Xanthakis et Liritzis (1991) ont reconstitué la courbe de variation de l'intensité en Grèce depuis 9000 ans et en ont réalisé une analyse des périodicités (Transformée de Fourier Rapide et analyse de spectre d'entropie maximum). Les périodes suivantes ont été trouvées :

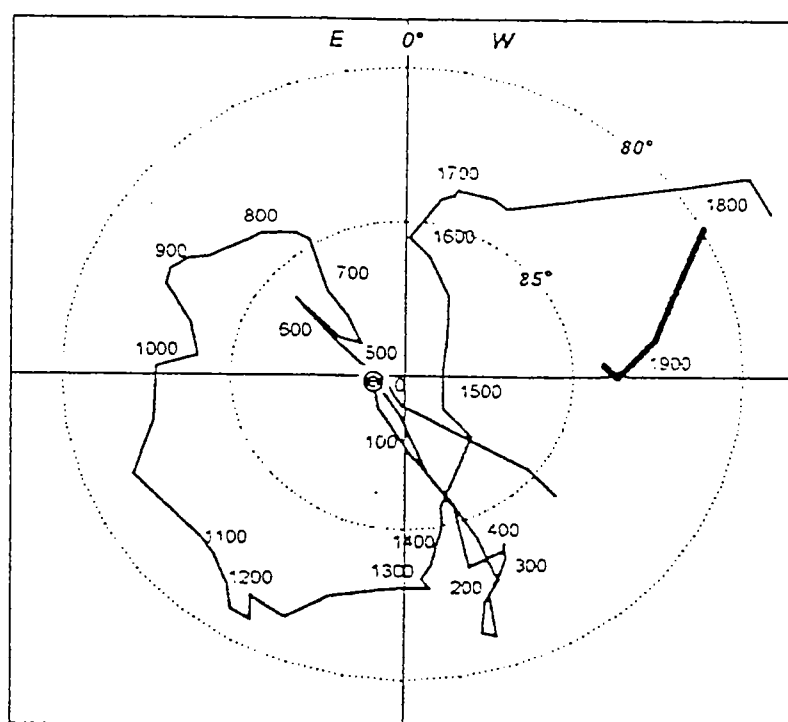
- pour l'intensité : 8000,  $1000 \pm 50$ ,  $1300 \pm 100$ , 600-700 ans,  $450 \pm 50$ , 180-340, 200, 100-130 et 35-130 ans.

- pour l'inclinaison : la période 1000 ans est nettement dégagée, mais sont aussi vraisemblables les périodes  $2000 \pm 100$ ,  $1250 \pm 100$ , 1500-1700, 4100-4600,  $700 \pm 50$ ,  $\sim 500$ ,  $\sim 200$ -260 ans.

- pour la déclinaison : 3400-5800,  $\sim 2700$ ,  $1900 \pm 100$ ,  $\sim 1000$ ,  $\sim 700$ ,  $\sim 500$  ans.



a



b

fig. I-13 : évolution de l'axe du PGM depuis 2000 ans.

-a : Merrill et Mc Elhinny, 1983. Chaque point représente une valeur moyenne calculée sur une fenêtre de 100 ans, les grands cercles en 900, 1300 et 1800 étant les intervalles de confiance (95%) respectifs. Les petits triangles sont les données de Barraclough présentées à la fig. I-8. La valeur moyenne sur 2000 ans est présentée sous forme d'étoile.

-b : reconstitution proposée par Daly et Le Goff, 1995.

Nous remarquerons que ces analyses présentent une plus grande diversité que les résultats présentés par Hulot en 1993, sans que les périodicités calculées soient clairement attribuées à des processus générant le CMT (Champ dipolaire, CND).

### calculs sur le PGV

Il est possible en réalisant des moyennes temporelles de fenêtre de dimension importante (500 ans et plus) de supprimer l'effet de la variation non-dipolaire, et de calculer la position géographique et la valeur du dipôle magnétique dans le passé.

Les figures I-13 a et b présentent la reconstitution de la variation du PGV depuis 2000 ans.

Les pôles moyens, pôles géomagnétiques virtuels ou PGV, calculés sur des fenêtres de 100 ans, sont tous inscrits dans un angle de 80 à 90° de longitude nord. L'interprétation de Daly et Le Goff (1995) est légèrement différente de celle Merrill et Mc Elhinny (1983) particulièrement dans la période 0 à 600 ap. J.C. (fig. 13-a) :

- Daly et Le Goff utilisent les données de variation d'intensité et de directions les plus complètes en 1995 (Bulgarie, Ukraine, Caucase et Japon) ainsi que les données de directions de l'Angleterre, France, Arizona et Amérique centrale (fig. 13-b),

- Merrill et Mc Elhinny ont utilisé des données provenant des deux hémisphères : Amérique centrale, du nord, Europe du nord (Islande, Grande Bretagne et Pologne), Europe du Sud (Sicile, Bulgarie, Ukraine et Géorgie), Afrique de l'Est, Japon et Hawaï. Comme on le voit le jeu de données est relativement différent.

Toutefois la position moyenne, calculée à partir d'une fenêtre de 2000 ans, permet de situer le pôle du dipôle très près de l'axe de rotation ( $\lambda_{PGV} = 88.6^\circ$ ,  $\varphi_{PGV} = 89^\circ$ , selon Daly et Le Goff)

En 1982 Mc Elhinny et Senanayake ont réalisé une synthèse des données mondiales d'intensité dans une fenêtre temporelle de 0 à 12000 ans av. J.C. Afin de supprimer les effets possibles de variation du CND, ils ont calculé les valeurs de moment dipolaire avec des fenêtres de 500 ans pour les 4000 dernières années B.P., puis avec des fenêtres de 1000 ans pour les 8000 années antérieures.

Le résultat obtenu pour l'hémisphère nord, où est concentrée la majorité des données, décrit un moment dipolaire ayant varié entre  $(6.73 \pm 0.65) 10^{22} \text{ Am}^2$  et  $(11.28 \pm 0.63) 10^{22} \text{ Am}^2$ , presque du simple au double, avec une moyenne de  $8.75 10^{22} \text{ Am}^2$ .

En remontant dans le passé, le moment voit sa valeur augmenter des  $8 10^{22}$  actuels à  $(11.28 \pm 0.63) 10^{22} \text{ Am}^2$ , vers 2750 B.P.. Puis il décroît jusqu'à atteindre  $\approx (6.73 \pm 0.65) 10^{22} \text{ Am}^2$  vers 6500 B.P. Un maximum à  $(8.61 \pm 1.17) 10^{22} \text{ Am}^2$  est ensuite atteint vers 8500 B.P., suivi d'une nouvelle décroissance vers  $(6.76 \pm 1.17) 10^{22} \text{ Am}^2$  vers 10500 B.P. (fig. I-14).

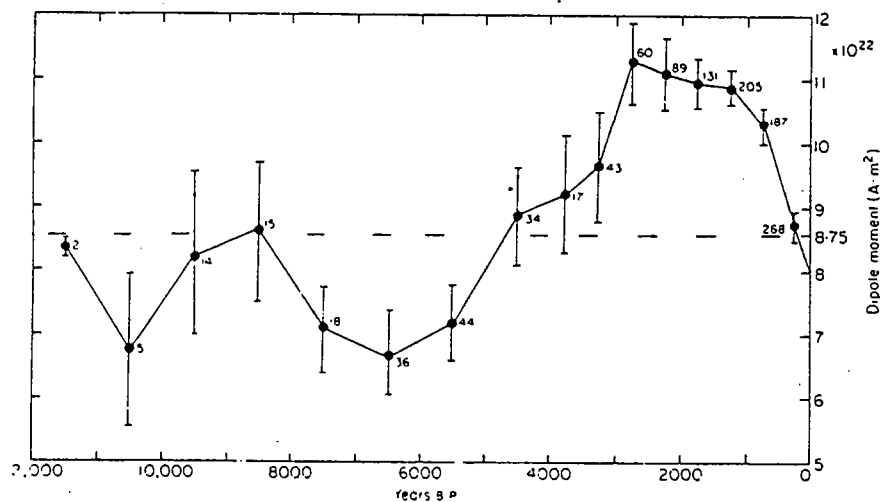


fig. I-14 : variation du moment dipolaire depuis 12000 ans (Mc Elhinny et Senanayake, 1982). Chaque valeur représente une moyenne de données réparties sur 500 ans avec l'intervalle de confiance à 95% associé.

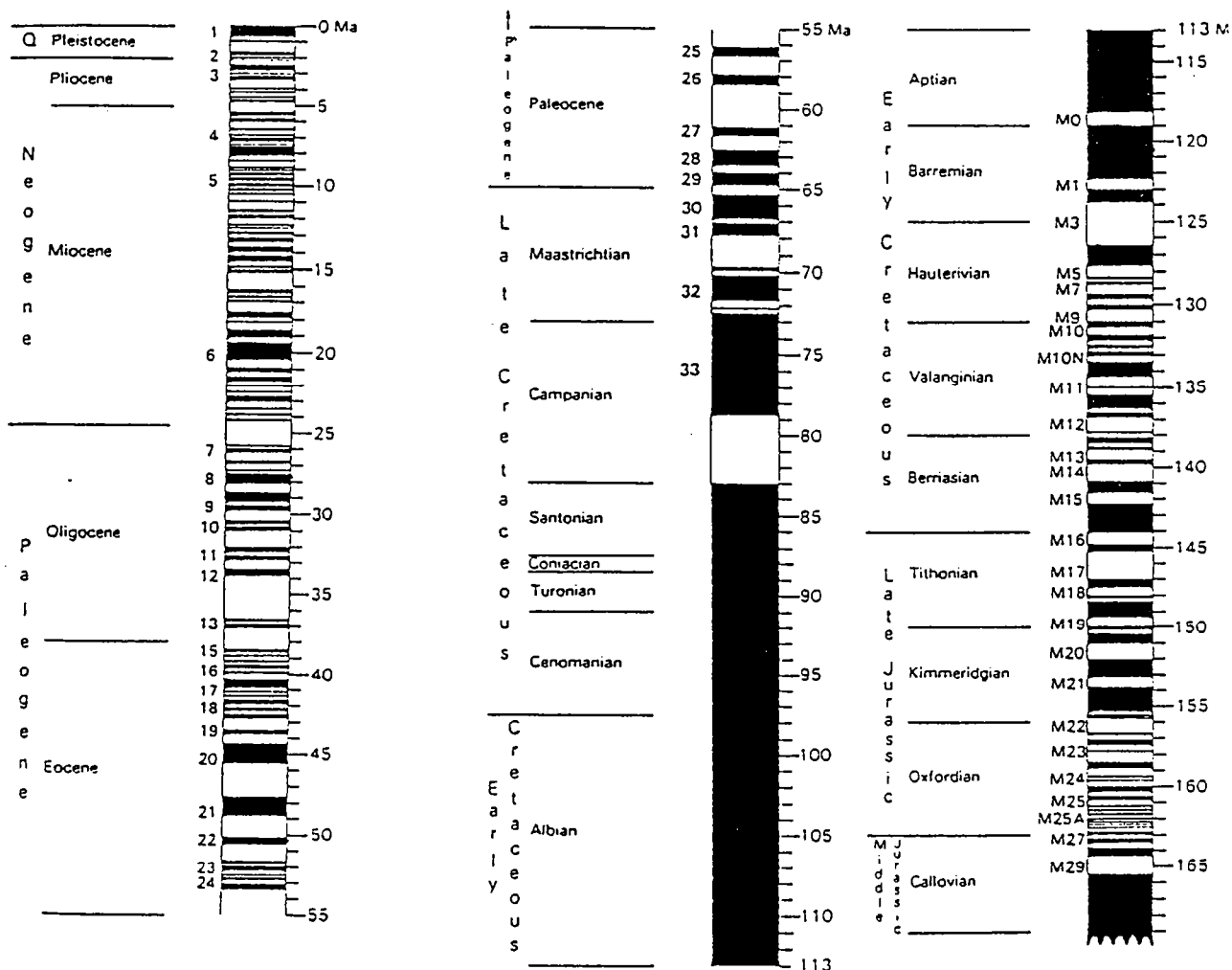


fig. I-15 : échelle de référence des inversions géomagnétiques sur les derniers 170 Millions d'années (d'après Cox, Harland, 1982).



La contribution du CND à la déviation associée aux moyennes calculées sur les fenêtres de 1000 ans serait de 17.5 %. Les auteurs en concluent que la variation du CND est toujours en proportion constante de celle du CD.

### **C) Variation séculaire : données paléomagnétiques**

Le paléomagnétisme est la seule voie d'accès à des données d'âge supérieur. Deux voies ont surtout été explorées pour la reconstitution de la variation paléoséculaire :

- l'étude des variations d'intensité et directions enregistrées dans les roches volcaniques,
- l'étude des directions et intensité relative enregistrées dans les roches sédimentaires.

L'analyse paléomagnétique des roches magmatiques permet d'avoir une vision ponctuelle du champ. Si les conditions de dépôt s'y prêtent, les roches sédimentaires permettent l'obtention de segments de la série chronologique des variations.

La figure la plus marquante du paléomagnétisme est l'inversion du champ magnétique, le pôle nord magnétique devenant un pôle sud magnétique. Longtemps remis en question ce phénomène est maintenant bien accepté du fait de l'évolution des méthodes de datation qui permettent de vérifier le synchronisme d'événements trouvés dans des roches de diverses provenances géographiques. L'ensemble des successions de périodes normales et inverses est bien établi, jusqu'à 160-170 Mn d'années environ (fig. I-15), grâce aux études de planchers océaniques complétées par les études paléomagnétiques de roches terrestres.

De nombreuses questions restent à résoudre quant au déroulement de l'inversion et à la contribution des parties dipolaires et non dipolaires du champ.

Certains faits semblent toutefois se dégager.

Ainsi il apparaît que lors de la transition l'intensité du champ diminue jusqu'à atteindre 10% environ de la valeur avant inversion ce qui signifie une forte baisse de l'intensité du champ dipolaire.

La durée du phénomène semble relativement courte (quelques milliers d'années) par rapport à la durée des périodes stables (jusqu'à plusieurs dizaines de millions d'années).

L'hypothèse d'un regroupement selon deux bandes longitudinales préférées des trajectoires de PGV a été proposée (Tric & al, Laj & al., 1991). Cette proposition est actuellement très discutée. Il semble que ces figures, observées à partir de l'étude de roches sédimentaires, ne soient pas retrouvées par l'étude de roches volcaniques (Prévot & Camps, 1993). Un regroupement lié à une mauvaise répartition des sites géographiques étudiés, combinée à des problèmes d'enregistrement, a aussi été évoqué (Courtillet & Valet, 1995).

Le mécanisme mis en jeu lors de l'inversion apparaît donc complexe. Plusieurs autres observations semblent en effet aller vers la complexité, qu'il s'agisse de l'enregistrement de variations brusques et rapides des directions du champ, de 4 à 8° par jour, dans certaines coulées mises en place rapidement (Camps, 1994), ou de la diversité de répartition des pôles des PGV, à la surface du globe,

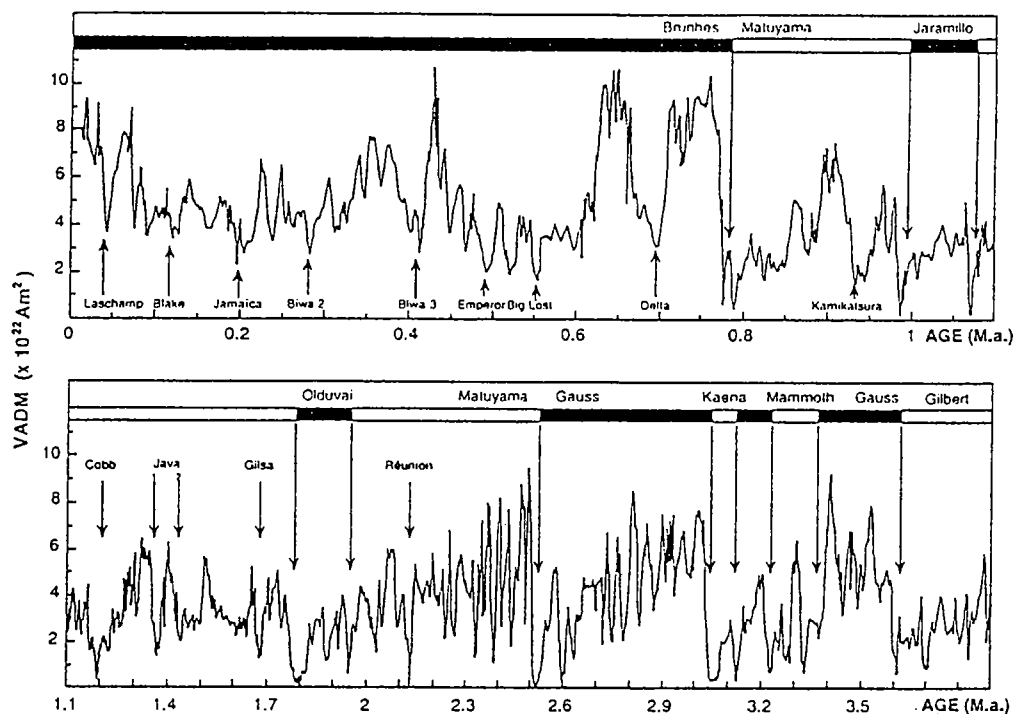


fig. I-16 : variation de l'intensité relative depuis 4.0 Ma d'années. Les bandes noires (et blanches) représentent les intervalles de polarité normale (et inverse). Les flèches indiquent les positions des excursions et inversions. Suite au raccordement avec des valeurs de variation absolue, la courbe est elle même présentée comme une courbe de variation absolue du moment dipolaire (d'après Valet & Meynadier, 1993, in Courtillot & Valet 1995).

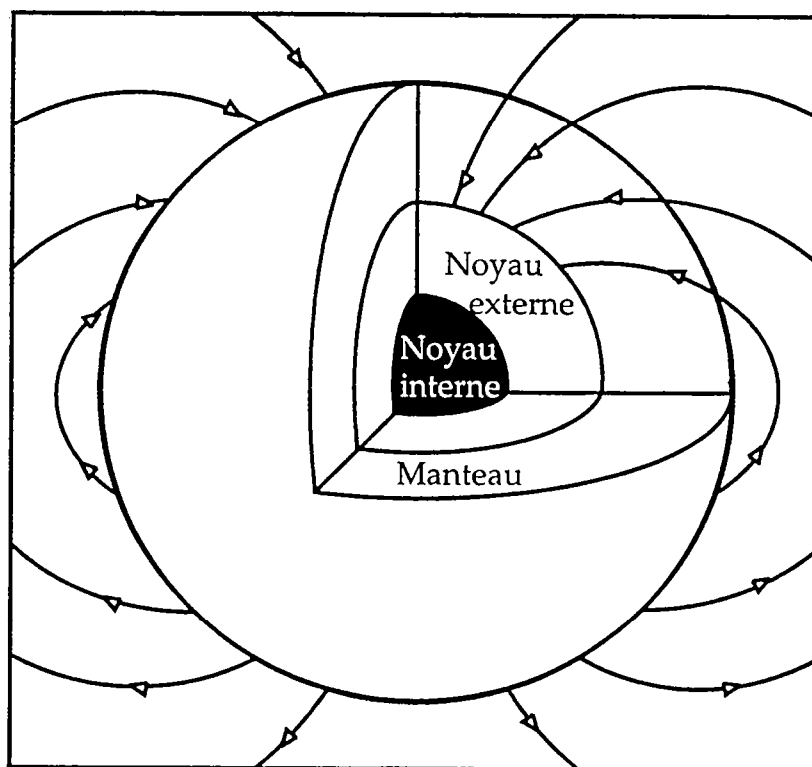


fig. I-17 : coupe de la Terre avec ses différentes enveloppes. Sont aussi représentées les lignes de force du champ magnétique (d'après Bloxham et Gubbins 1990).

diversité qui, pour une inversion déterminée, ne correspond pas à celle qui serait observée lors de la rotation d'un dipôle (Dagley & Lawley, 1974).

L'étude chronologique et continue de la variation relative de l'intensité à partir de sédiments marins accumulés sur une grande durée (jusqu'à 4.7 Ma, Constable & Tauxe, 1987, Tric & al., 1992, Meynadier & al, 1994, Thibaut & al, 1995, Yamazaki & al., 1995) permet de prolonger la courbe de variation du moment dipolaire présentée par Mc Elhinny & Senanayake (1982). On distingue sur ces analyses les différents événements paléomagnétiques, comme les inversions qui y sont nettement visibles (fig. I-16). On note, pour les périodes autres que Bruhnes (de 0.7 Ma à l'actuel), la mieux documentée, la répétition de figures dites en dents de scie asymétriques : suite à l'inversion, le champ retrouverait rapidement son intensité "normale" pour décroître plus ou moins régulièrement par la suite jusqu'à l'inversion suivante.

En recalant le début du diagramme d'intensité relative avec le diagramme présenté par Mc Elhinny & Senanayake (1982), ou les valeurs d'intensité obtenues pour des roches volcaniques plus âgées, il est possible de décrire la variation de l'intensité en termes "absolus". L'intensité maximale qui aurait été obtenue pendant cette période de 4.7 Ma d'années serait de  $10 \text{ à } 11 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ , comme il y a  $\sim 0.42 \text{ Ma}$  par exemple. Les valeurs les plus basses auraient été inférieures à  $1 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ , observées en correspondance avec la plupart des inversions référencées.

### I-1-3 Origine du CMT

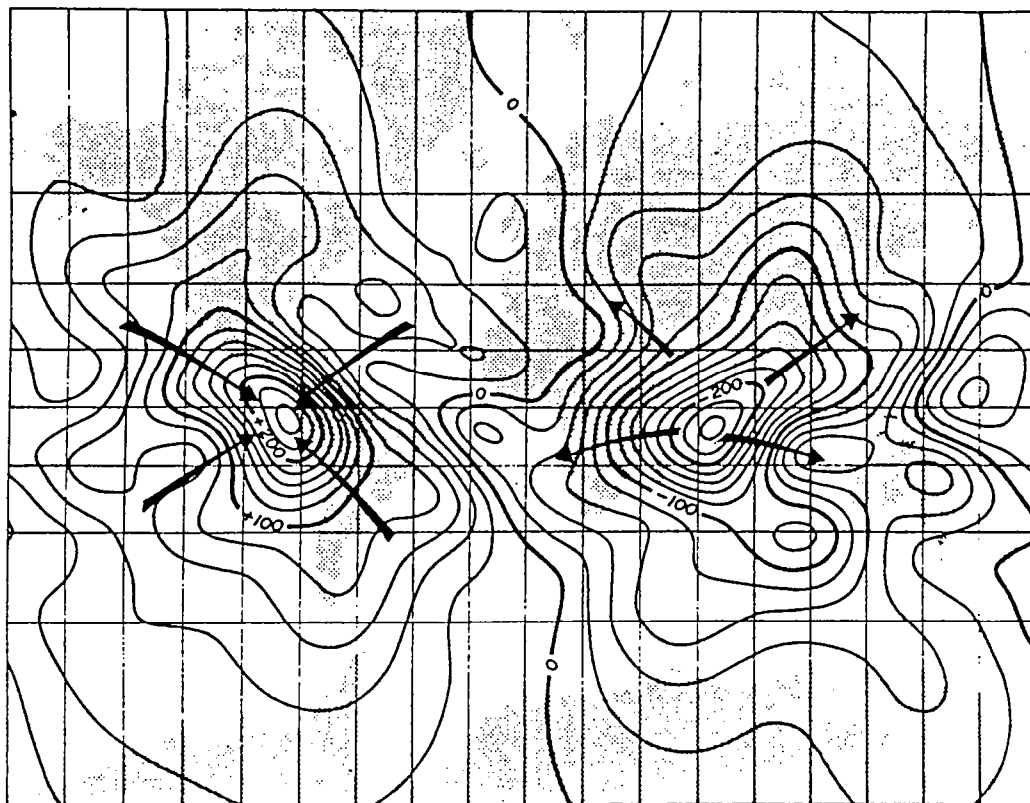
C'est donc dès 1836 que les analyses de Gauss ont permis de confirmer les hypothèses émises en 1600 par William Gilbert, c'est à dire montrer que le CMT est quasi totalement d'origine interne.

Grâce au paléomagnétisme, qui mesure les aimantations acquises dans les roches dans les temps géologiques, l'existence de ce dernier apparaît même liée à l'histoire de la Terre, puisque la présence de roches aimantées, âgées de 3.5 milliards d'années (Ga), en serait le témoignage le plus ancien (dans la mesure où l'aimantation est rattachée à la mise en place).

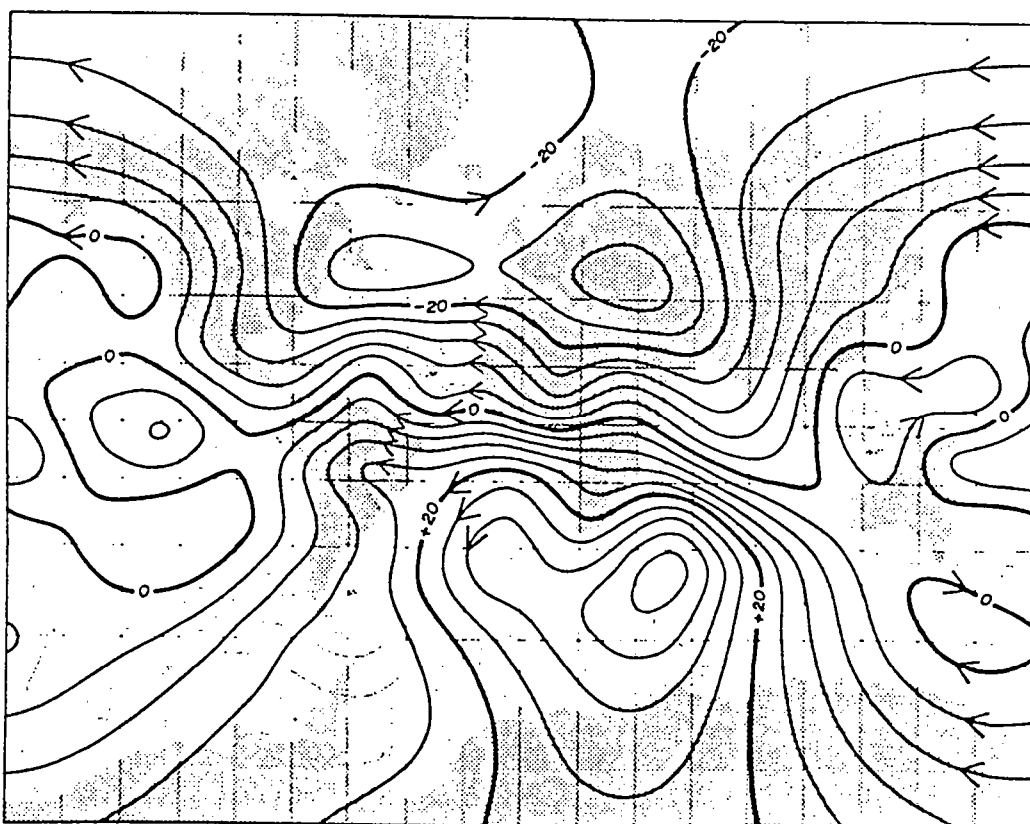
L'origine du CMT est maintenant plutôt reliée à un processus électromagnétique de type dynamo auto-excitée, comme suggéré en 1919 par Sir Larmor (Merrill & Mc Elhinny, 1983).

Plusieurs éléments sont désormais connus qui pourraient contribuer à la création de la géodynamo. Ce sont surtout :

- la rotation terrestre (il existe probablement un lien entre la rotation et le fait que les pôles magnétiques soient si proches de l'axe de rotation),
- la présence du noyau, de composition riche en fer, à l'état liquide (noyau externe, fig. I-17),



a



b

fig. I-18 a et b : mouvements de matière à la limite Noyau -Manteau, calculés par prolongement vers le bas de la composante radiale du CMT mesuré à la surface. (Le Mouél, 1986). La figure 19-a présente les mouvements poloïdaux, d'échange en profondeur de matière, la figure 19-b, les mouvements toroïdaux ou mouvements de surface.

- les mouvements au sein de ce noyau.

Nous pouvons ainsi concevoir que le noyau liquide, très conducteur (essentiellement constitué de fer et de nickel), est le sein de mouvements (convection thermique, différences de densité entre éléments lourds et éléments légers) qui engendrent des déplacements importants de matière. La présence d'un champ magnétique préexistant provoque un courant électrique. Ce courant vient à son tour générer un nouveau champ magnétique (Loi de Lenz), qui, s'il est de bonne polarité, permet d'entretenir le CMT préexistant.

A cette présentation simplifiée viennent toutefois se rajouter de sévères contraintes à qui tente de modéliser un tel champ. En effet le modèle réalisé doit pouvoir engendrer des figures particulières au magnétisme terrestre telles que :

- une forte dipolarité,
- la variation d'intensité du CD et du CND,
- les dérives des CD et CND,
- les inversions,

- la pérennité du champ. Le CMT est semble-t-il présent depuis au moins 3.5 Ga d'années, alors qu'un champ de même valeur s'éteindrait au bout de 10000 ou 15000 ans si il n'était pas entretenu (Merrill & Mc Elhinny, 1983, Merrill & Mc Fadden, 1995).

Ce n'est que récemment, à l'aide d'un ordinateur de très grosse capacité de calcul, qu'un modèle numérique de dynamo magnétohydrodynamique fonctionnant sur des caractéristiques et des lois proches de celles estimées pour la Terre, a permis de reconstituer des comportements identiques à ceux observés pour le CMT, inversion comprise (Glatzmaier & Roberts, 1995, a et b).

Les figures obtenues à partir de cette simulation sont très proches des constatations récentes des géomagnéticiens et géophysiciens quant à la nature et à l'allure des mouvements régnant dans le noyau.

En supposant en effet que le CMT trouve son origine dans le noyau, et en posant comme hypothèse que les lignes de flux magnétique sont solidaires du fluide et se déplacent avec lui (hypothèse du flux gelé), le champ mesuré à la surface peut être considéré comme une image déformée de la répartition des composantes magnétiques à la limite noyau-manteau. Cette limite est choisie parce que l'écorce terrestre et le manteau sont considérés comme de faible contribution au CMT.

La projection des caractéristiques magnétiques (prolongement vers le bas de la composante radiale en fait) est réalisée à l'aide de la décomposition en harmoniques sphériques. Des cartes de répartition sont ainsi réalisées.

Dans l'hypothèse où les mouvements à la surface du noyau sont tangentiellement géostrophiques (équilibre de la force de Coriolis et de la composante horizontale du gradient de pression), les mouvements sont parallèles aux isobares, et la vitesse horizontale peut être calculée.

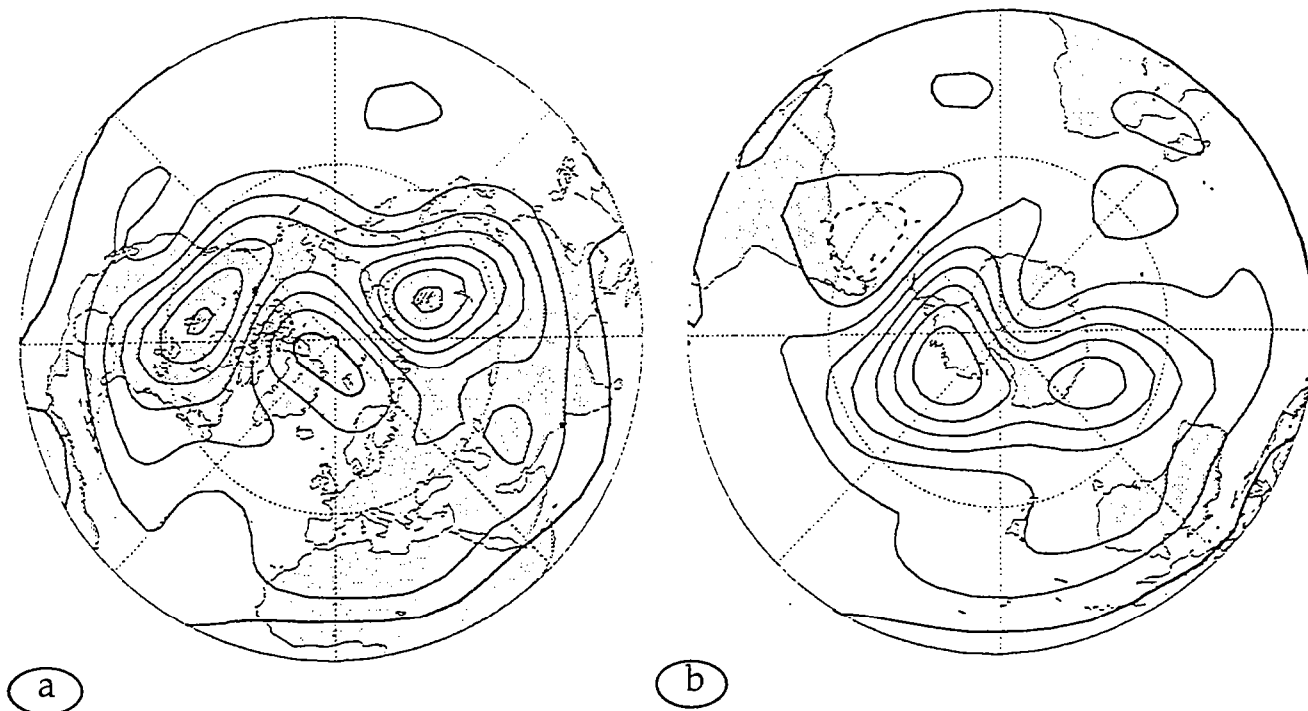


fig. I-19 a et b : figures stationnaires, obtenues par le calcul de la composante radiale moyenne du CMT, entre 1840 et 1890, prolongée vers le bas à la limite Noyau-Manteau (Bloxham et Gubbins, 1992). On y voit au nord (20-a) deux zones de forte concentration de flux, disposées à haute latitude sur l'Amérique et la Sibérie, réparties de façon symétrique par rapport au plan équatorial, avec deux zones au sud (20-b) qui jouxtent l'Antarctique.

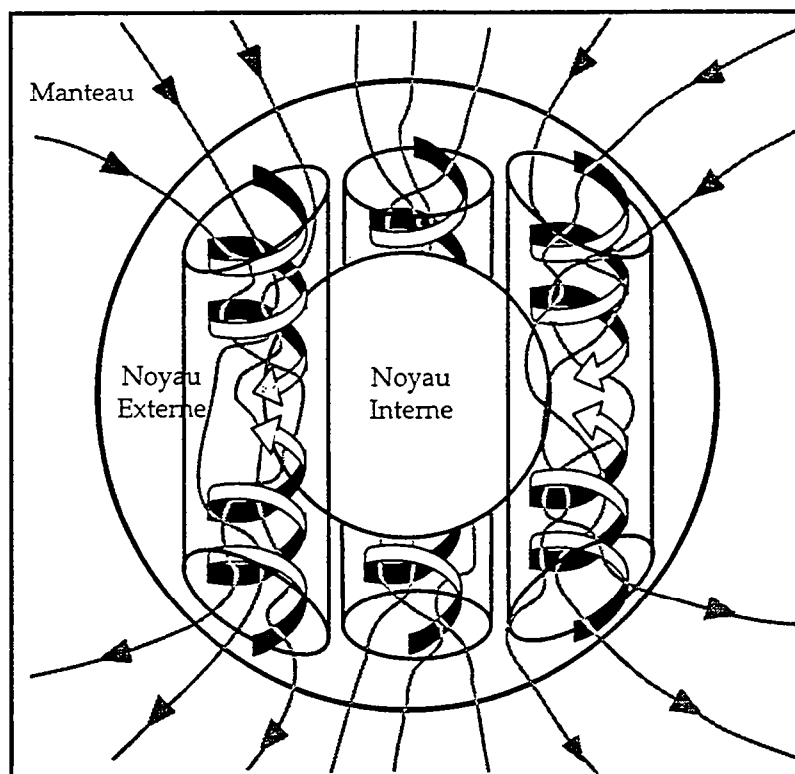


fig. I-20 : modèle de courants contrarotatifs (d'après Bloxham & Gubbins, 1990)

Ainsi, à partir de mesures d'observatoires, ont été dégagées deux zones qui seraient le siège de mouvements verticaux de matière (mouvements poloidaux), une située sous le sud de l'Inde, à mouvement ascendant, et une sous la partie ouest du Pérou, à mouvement descendant. Outre ces deux déplacements, des mouvements horizontaux (mouvements toroïdaux), transcriraient des déplacements importants dans la partie Atlantique et beaucoup plus faibles dans la partie Pacifique, engendrant la dérive vers l'ouest déjà évoquée (fig. I-18 a et b, Le Mouél, 1986).

L'injection des données de mesures directes historiques (datées pour les plus anciennes de 1640, travaux de Bloxham et Jackson, 1992) a singulièrement fait évoluer la vision des phénomènes situés dans cette couche tout en la compliquant. Quatre foyers, de forte concentration de flux sont ainsi trouvés à haute latitude, répartis de façon quasi symétrique face à face par rapport au plan équatorial. Ceux-ci ont une grande contribution au dipôle axial et pourraient correspondre aux extrémités de deux colonnes de fluide, parallèles à l'axe de rotation, deux rouleaux convectifs en fait. La symétrie à 120°E et 120°W suggère qu'un troisième pourrait être présent sous la longitude 0 (fig. I-19, a et b). Nous noterons que l'analyse des données satellites MAGSAT, pour l'année 1980, a permis à Hulot (1992) d'arriver à une conclusion similaire, c'est à dire "que les mouvements à la surface du noyau possèdent de grandes structures symétriques" qui pourraient être reliés à des phénomènes de convection à grande échelle.

En résumé le CMT pourrait trouver son origine et l'énergie nécessaire à son maintien dans le noyau terrestre. Ce noyau serait le sein de grands mouvements de convection, organisés sous forme de rouleaux contrarotatifs (fig. I-20) Chacun engendrerait un mouvement hélicoïdal de la matière, assimilable au trajet du courant dans une bobine, venant ainsi participer au processus de régénération du champ magnétique terrestre. De la répartition des colonnes, parallèles à l'axe de rotation, proviendrait la forte dipolarité mesurée en surface ainsi que la disposition calquée sur les figures de symétrie de la Terre, axes de dipole proches de l'axe de rotation, ligne équatoriale magnétique à cheval sur l'équateur, et progression des valeurs d'intensité et d'inclinaison en fonction de la latitude.

## **I-2 méthodologie de l'archéomagnétisme de direction**

### **I-2-1 Historique**

Les premières observations de parallélisme entre direction d'aimantation et direction du champ d'induction, retrouvées pour certaines roches par rapport au CMT, datent du 19<sup>e</sup> siècle.

Les premières études de comportement magnétique de l'argile cuite ont été effectuées par Folgheraiter. Suite à ses travaux celui-ci put conclure, en 1899, que, si la position de la brique ou du pot dans le four (au moment de sa cuisson) est connue, alors l'ATR acquise au refroidissement peut constituer un enregistrement de la direction du CMT (in Merrill & Mc Elhinny, 1983). Cette remarque constitue le fondement de l'archéomagnétisme. Elle en résume toute la philosophie, la recherche des anciennes directions du CMT, tout en énonçant les conditions à vérifier pour effectuer une telle recherche :

- l'aimantation doit être parallèle au champ inductif,
- il faut connaître la position de l'objet lors de l'acquisition de l'aimantation si l'on veut déterminer les directions du champ.

Dès lors le premier but était d'étudier la variation dans le temps, des caractéristiques du champ magnétique terrestre. La tâche paraissait facile, la seule difficulté apparente étant de pouvoir regrouper une collection de matériels archéologiques suffisamment représentative pour permettre de reconstituer les courbes de variation avec un degré de précision suffisant. Une fois cette étape franchie, les courbes étant considérées comme ne présentant plus que des incertitudes minimales, alors la recherche archéomagnétique pouvait suivre deux voies complémentaires : continuer à étudier des sites jalons pour reconstituer la variation du champ, et utiliser cette reconstitution afin de dater la cuisson des objets archéologiques en terre cuite.

C'est à ces travaux que s'attacha Thellier avec la présentation d'une étude approfondie du comportement magnétique des argiles, dès 1938, puis la publication de nombreux résultats sur la reconstitution des variations de direction du CMT, résumés dans son article final de 1981.

Depuis cette date cette voie a été suivie, entre autre pour la France, à St-Maur des fossés (où opérait Thellier) par I. Bucur, et à Rennes, au sein du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I (UMR 153).

### **I-2-2 Méthodologie de l'Archéomagnétisme**

La datation archéomagnétique repose sur deux phénomènes physiques :

- l'existence du champ magnétique terrestre (CMT),
- l'aimantation thermorémanente (ATR).



L'aimantation thermorémanente est une aimantation persistante, acquise consécutivement à une chauffe et un refroidissement au sein d'un champ magnétique. Les argiles cuites et certaines roches ont cette propriété. La rémanence est liée à la présence d'oxydes de fer de type ferromagnétique (au sens large) comme les magnétites, hématites, titanomagnétites ou titanohématites. Ces oxydes, qui peuvent se présenter sous des formes microscopiques, "figent" l'aimantation lors du refroidissement depuis la température de Curie (température au delà de laquelle les grains perdent leur comportement ferromagnétique, 670°C pour l'hématite, 580°C pour la magnétite) jusqu'à la température ambiante.

Il existe d'autres voies d'acquisition d'aimantation (aimantation rémanente visqueuse, ARV, aimantation rémanente isotherme, ARI, aimantation rémanente anhystérétique, ARA, aimantation rémanente détritique, ARD), mais le sujet principal traité ici est l'aimantation thermorémanente, acquise consécutivement à l'utilisation d'argile et d'un foyer par l'homme.

Les matériaux étudiés sont classés selon deux types :

- matériel resté en place depuis la dernière cuisson (fond de foyer, fond de four, foyer de thermes) pour lequel il sera possible de calculer l'inclinaison et la déclinaison du champ magnétique présent à la dernière utilisation,
- matériel déplacé consécutivement à l'acquisition de l'aimantation, mais dont la forme permet de retrouver la position de cuisson et donc, de connaître l'inclinaison (uniquement) du champ.

## **A) Etude et datation de matériel orienté et prélevé in-situ**

Seul ce type de matériel, qui est retrouvé dans la position de cuisson, est susceptible de fournir des indications sur l'inclinaison et la déclinaison anciennes. Aussi, avant d'être détaché, le prélèvement est orienté par rapport à un repère géographique qui est de préférence le pôle nord géographique sinon le pôle nord magnétique. L'horizontale au site, pour le calcul de l'inclinaison ancienne, est matérialisée par la confection d'un chapeau de plâtre nivelé avec un niveau à bulle. Le prélèvement peut aussi être effectué à la carotteuse avec un repérage à la tête d'orientation, technique couramment employée pour le paléomagnétisme. Le nombre de prélèvements est faible, pouvant varier entre dix et vingt.

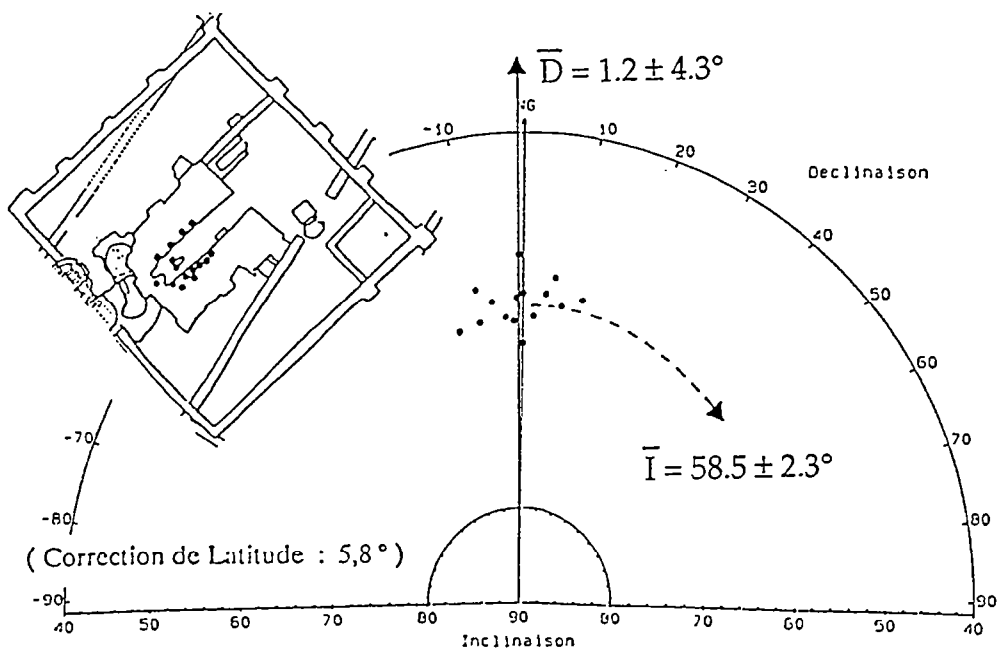


fig. I-21 : diagramme de Schmidt. Projection des couples de valeurs Inclinaison-Déclinaison des échantillons extraits du four n°7 du site de Sallèles d'Aude. En insert, plan du four et emplacement des 15 échantillons prélevés (Laubenheimer F., Lanos P., 1994).

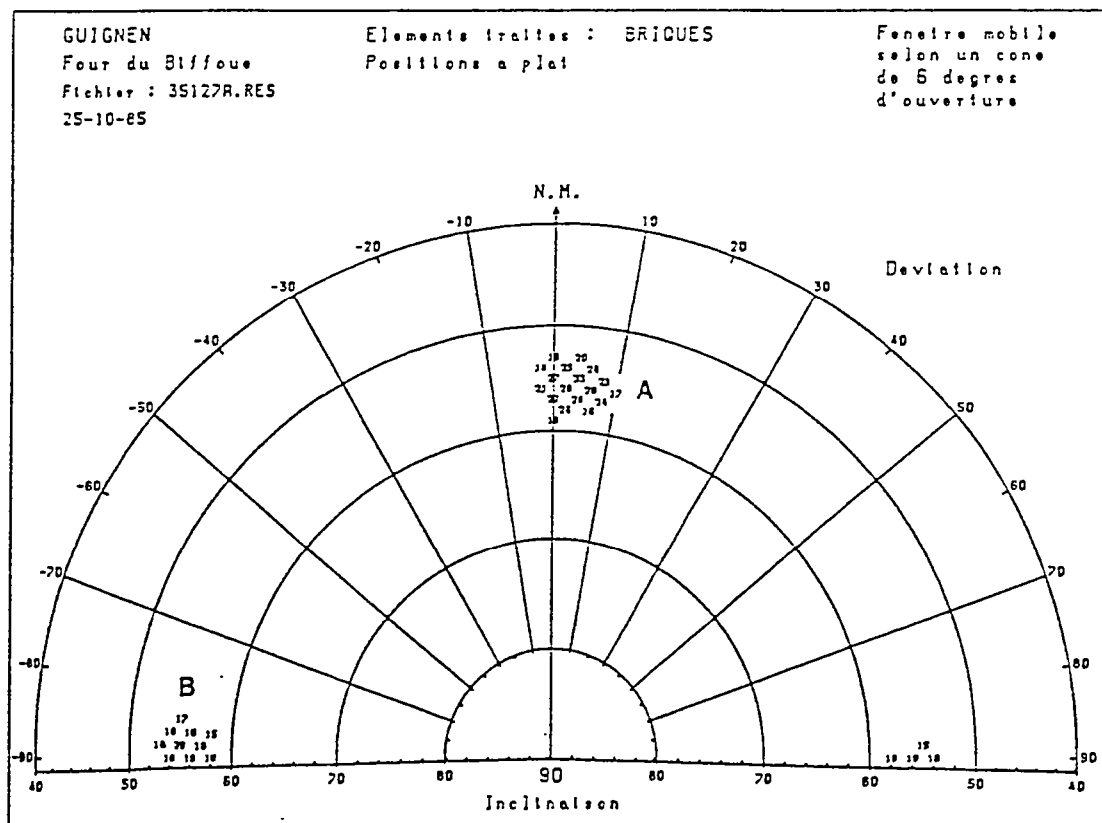


fig. I-22 : Diagramme de densité du lot de matériel déplacé du site de Guignen (Lanos, 1987).

## Présentation des résultats

L'aimantation portée par chaque échantillon est mesurée et, si besoin est, des corrections sont appliquées. Le parallélisme de l'aimantation au champ est une des conditions fondamentale à vérifier si l'on veut que la direction mémorisée par l'échantillon soit une image non biaisée de celle du champ ancien. Les argiles cuites peuvent être intrinsèquement sujettes à des perturbations magnétiques telles que l'effet de forme (ou effet de champ démagnétisant) ou l'effet d'anisotropie d'ATR.

L'effet de forme peut se manifester lorsque la terre cuite présente une forme très aplatie et qu'elle possède une forte aimantation. L'aimantation a alors tendance à s'aligner avec le plan d'aplatissement de l'objet (Lanos 1987a, 1987b).

L'anisotropie d'ATR se manifeste aussi par une déviation de la direction de l'aimantation par rapport à la direction du champ d'induction (Lanos 1987a, Goulpeau & al., 1989). Cette déviation est fonction de la direction du champ par rapport à l'échantillon. Pour certaines directions, dites "directions de facile aimantation", la déviation sera nulle. A l'inverse d'autres directions, dites "directions de difficile aimantation", présenteront une déviation maximale (Rogers & al., 1979). Nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

Les valeurs de chaque échantillon sont ensuite présentées selon différents modes :

- histogrammes,
- diagrammes de pointage,
- diagrammes de densité.

Les histogrammes des valeurs d'inclinaisons, déclinaisons et même d'aimantations rémanentes permettent de visualiser l'homogénéité des valeurs.

Un diagramme à projection Lambert à surface égale, encore appelé canevas de Schmidt, permet de pointer la répartition inclinaison-déclinaison de chaque échantillon par rapport à l'ensemble du lot. Ce diagramme a été adapté afin de tenir compte d'un intervalle de variation de l'inclinaison compris entre  $45^\circ$  et  $90^\circ$  (fig. I-21). Ces limites sont fixées en fonction de la fourchette de variation de l'inclinaison en Europe durant les trois derniers millénaires. Nous savons par les mesures de matériel prélevé *in-situ* que celle-ci a varié entre  $55^\circ$  et  $75^\circ$  (Thellier, 1938, 1981). La déclinaison sur le diagramme est comprise entre  $+90^\circ$  et  $-90^\circ$ . L'axe central correspond à la direction du nord géographique.

Des diagrammes de densité (fig. I-22) sont calculés à l'aide de la technique de la fenêtre mobile. En pratique, ces densités sont calculées de  $1^\circ$  en  $1^\circ$ , selon l'inclinaison et de  $2^\circ$  en  $2^\circ$  sur la déclinaison (ou sur la déviation dans le cas du matériel déplacé). Pour des raisons d'accès au fichier de mesures, chaque cône d'ouverture est incrémenté d'une unité chaque fois qu'une direction du diagramme lui appartient. Suite aux observations de Goulpeau et Langouët (1980) il s'est avéré que

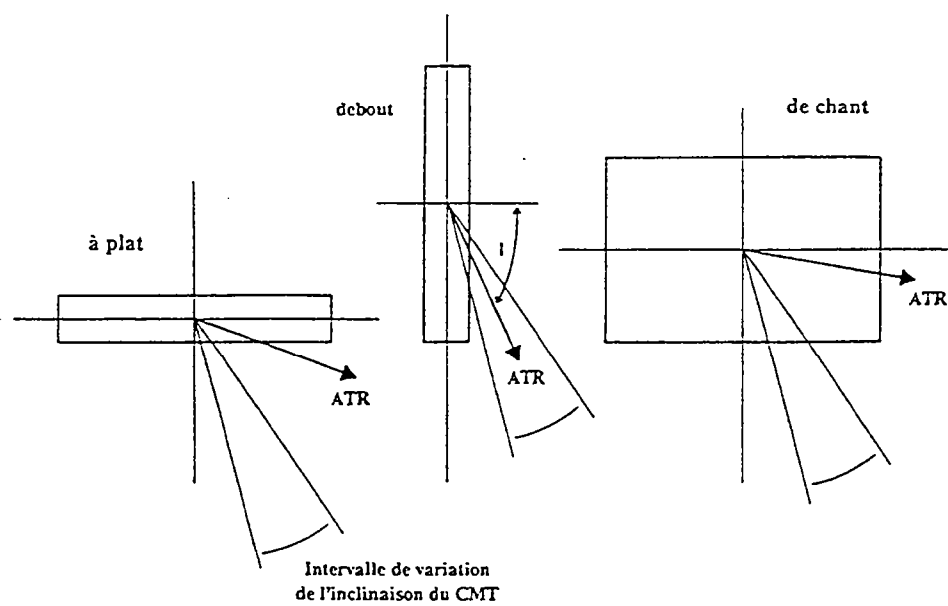


fig. I-23 : détermination de la position de cuisson et de la valeur de l'inclinaison à retenir (Lanos, 1987).

l'utilisation de cônes d'ouverture 8° permettait un bon lissage avec une atténuation du bruit de fond et la mise en évidence des valeurs maximales.

La statistique de Fisher (1953) est appliquée afin de calculer les directions moyennes ainsi que leurs intervalles de confiance. La méthode de Mc Fadden (1981) est prévue pour le cas où la répartition I-D se fait régulièrement entre +90° et -90° (ce qui est possible si le diagramme ne présente pas d'agglomérat, par exemple dans le cas de l'étude de matériel déplacé provenant d'un chargement circulaire).

Ce traitement statistique permet de calculer les caractéristiques moyennes d'inclinaison et déclinaison au site lorsque l'aimantation a été acquise.

Ces valeurs sont ensuite reprises afin d'estimer les valeurs du champ, à la même date, mais à la latitude de Paris. Le CMT est alors assimilé à celui développé par un dipôle axial et la correction prend en compte l'écart de latitude entre site et Paris

## **B) Etude à partir de matériel déplacé**

La condition minimale pour utiliser du matériel déplacé est de pouvoir retrouver la position de cuisson.

Partant de la constatation que les soles de fours (les planchers en quelque sorte), sur lesquelles reposent les pièces à cuire, sont globalement horizontales (Thellier, 1938), il s'agit de retrouver la face sur laquelle l'objet a reposé durant la cuisson pour déterminer la valeur de l'inclinaison.

Pour les parallélépipèdes comme les tuiles, les carreaux de pavages, les briques, chaque face est potentiellement utilisable. En simplifiant nous pouvons retenir trois positions possibles de cuisson : à plat, de chant et sur la tranche (fig. I-23).

Pour les objets à un axe de symétrie, comme les bols ou autres plats, le premier réflexe est de penser au fond comme face de support, mais il ne faut pas oublier que ces objets présentent une stabilité supérieure encore lorsqu'ils sont posés à l'envers, sur le bord. Le chargement du four peut alors être effectué en empilant les bols les uns sur les autres, avec une grande variabilité d'assise. A l'opposé des parallélépipèdes, ce matériel peut alors présenter une grande variété de positions de cuisson. L'erreur sur l'estimation de la position peut donc être importante. Ce qui explique qu'il soit rarement étudié afin de déterminer les directions archéomagnétiques.

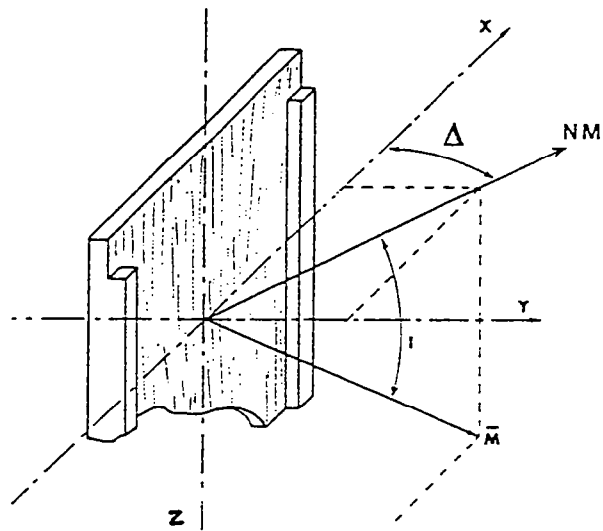


fig. I-24 : Déviation et Inclinaison mesurées sur une tuile cuite debout (Lanos, 1994).

La détermination de la position de cuisson utilise un critère de grande qualité. Durant les trois derniers millénaires, l'inclinaison, en France, a variée entre 55 et 75° (Thellier, 1938 et 1981). De toutes les faces présentées par les parallélépipèdes, seule une correspond à une face de cuisson telle que l'inclinaison est contenue dans la fourchette 55-75°. Il suffit donc de calculer laquelle permet d'obtenir ce résultat.

Mais si la position retenue correspond à la position vraie, la valeur d'inclinaison mesurée n'en est pas pour autant obligatoirement un enregistrement fidèle de l'inclinaison du champ. L'objet cuit peut en effet être décalé de l'horizontale du fait d'irrégularités contenues dans sa forme ou dans la sole. A ces petites variations qui engendrent de petites erreurs sur l'estimation peut s'ajouter une source d'erreur plus importante liée au mode de chargement : il est très fréquent pour caler les pièces longues, comme les tuiles par exemple, de leur donner un léger pendage.

Les problèmes liés aux irrégularités sont "gommés" par l'utilisation d'un grand nombre d'échantillons. Le traitement statistique d'une centaine d'échantillons permet de supprimer l'effet des irrégularités dont la distribution suit une loi aléatoire, et permet de déterminer une valeur moyenne d'inclinaison qui est un "excellent estimateur" de l'inclinaison du CMT (Lanos 1994). L'incertitude associée à la valeur moyenne est l'image de la dispersion.

Le problème du pendage des pièces cuites peut lui aussi être résolu comme nous allons le voir par la suite, car le pendage peut être détecté sur le diagramme de Schmidt.

En fait, la source la plus importante d'erreur peut provenir de la cuisson sur une sole non pas horizontale mais inclinée. Le problème ne se pose apparemment pas pour la période gallo-romaine car les soles à tirage oblique ont, semble-t-il, fait leur apparition qu'à partir du Moyen-Âge (Lanos, 1994). Le chargement devant tenir en équilibre sur la sole, les pièces à cuire sont disposées parallèlement à la direction de plus grande pente, se traduisant sur le diagramme de pointage par une direction unique d'aimantation. On ne peut hélas pas repérer de tels types de chargements.

## Notion de déviation

L'inclinaison déterminée, un autre renseignement reste accessible pour le matériel parallélépipédique : c'est l'angle entre la plus grande face verticale de l'objet posé sur la sole et la projection horizontale du nord magnétique ancien. C'est cet angle que Goulpeau et Langouët (1980) définirent comme déviation et qui fut noté  $\Delta$  (fig. I-24).

La déviation est une notion importante dans l'étude du lot. Introduite dans le diagramme de Schmidt, alors diagramme I- $\Delta$ , elle permet de visualiser la répartition de chaque pièce par rapport à l'inclinaison mais aussi par rapport au nord magnétique (dont l'axe remplace alors l'axe du nord géographique des diagrammes utilisés pour le matériel orienté et prélevé *in-situ*). Toutes les pièces cuites dans une position identique se retrouvent ainsi regroupées.

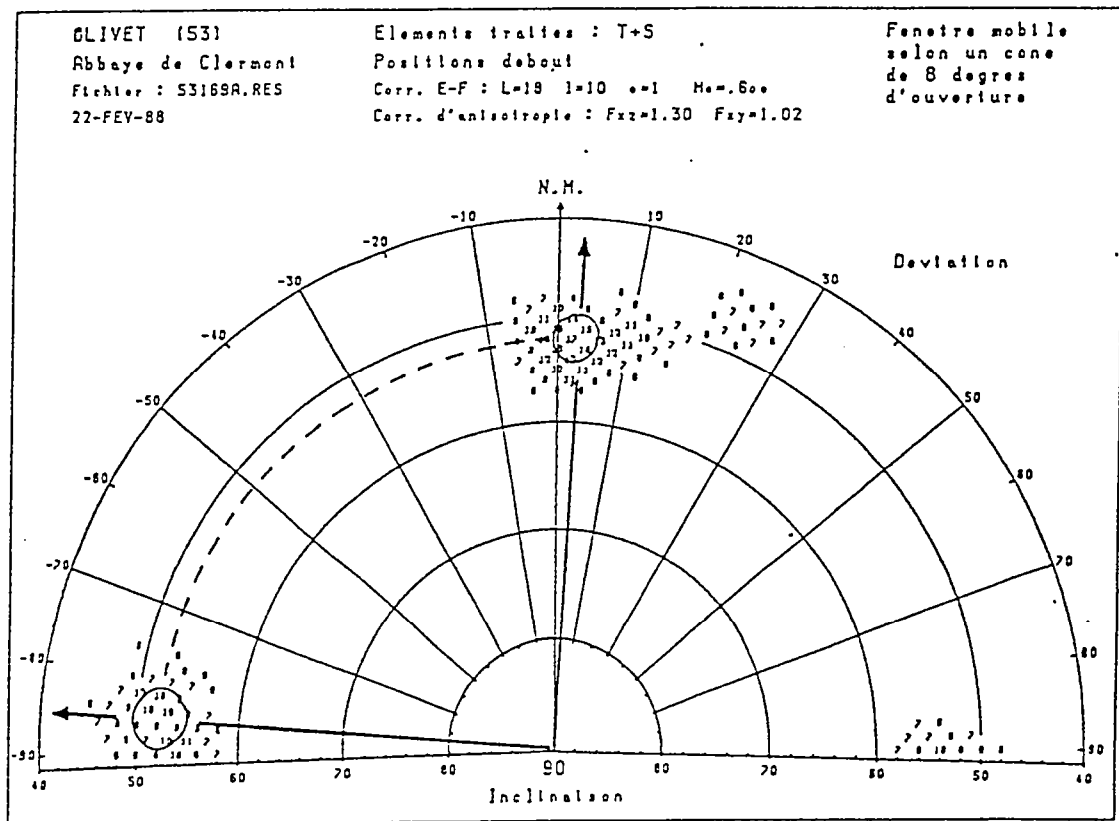


fig. I-25 : abbaye de Clermont (53169A). Etude d'un lot de matériel déplacé. Diagramme de densité faisant ressortir l'angle de Déviation (angle entre le Nord magnétique de l'époque et une des faces verticales de chaque pièce) et l'aspect complémentaire à 90° des deux principales concentrations de points (Lanos 1987).

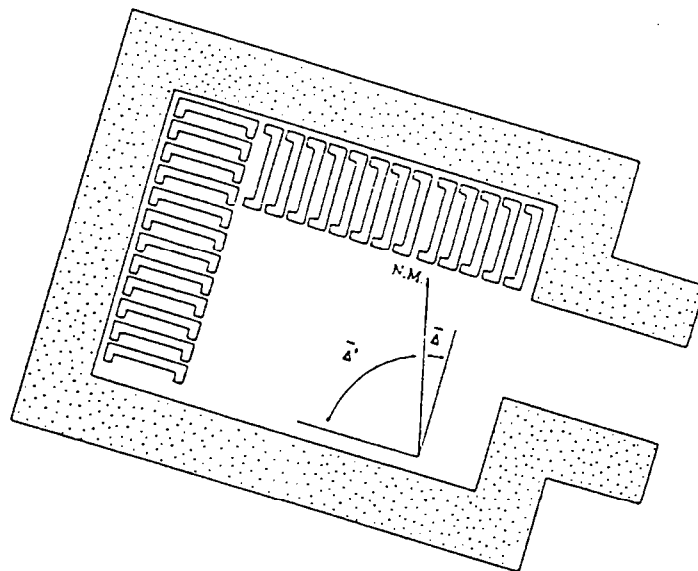


fig. I-26 : interprétation plausible du chargement des pièces de l'abbaye de Clermont lors de leur cuisson (Lanos 1987).



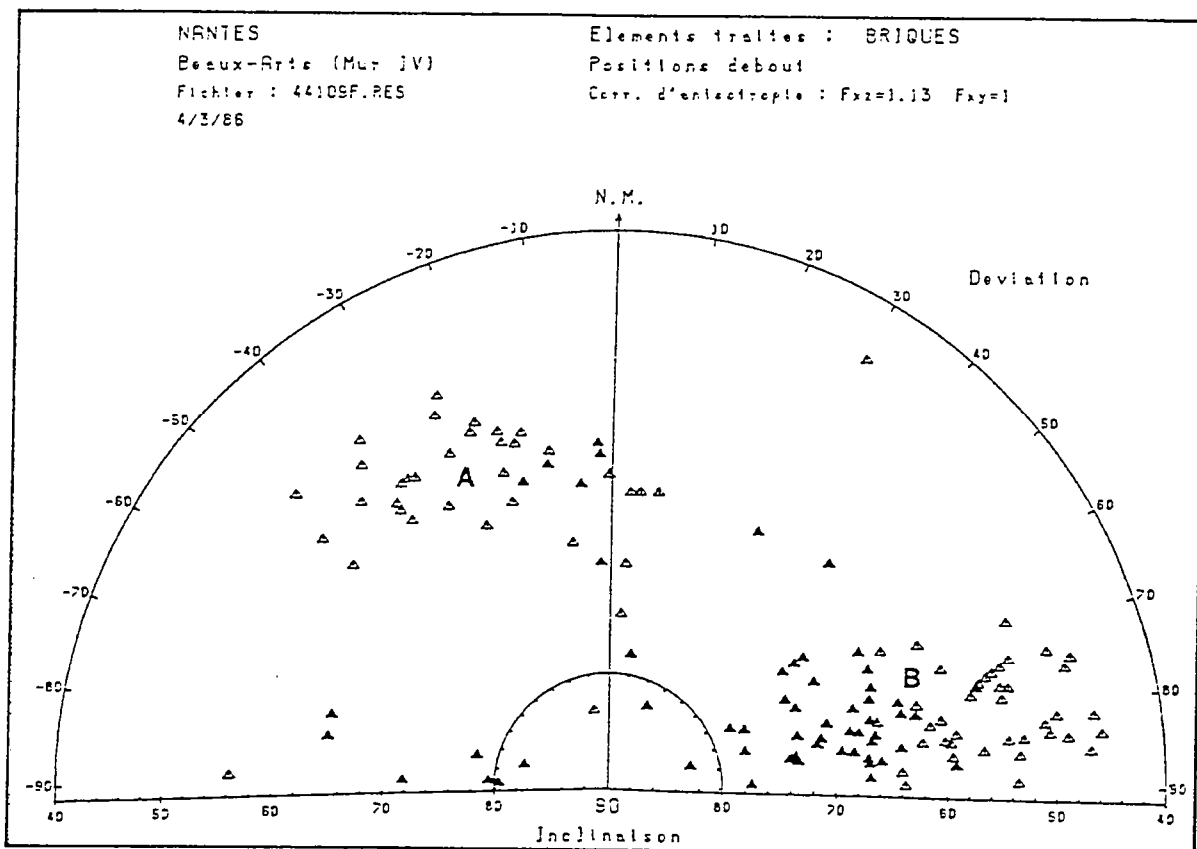
De fait le diagramme devient un outil qui permet de tester l'homogénéité, en terme de directions magnétiques, du lot étudié (fig. I-25).

Un troisième élément d'information a aussi été dégagé. Outre qu'il tient compte de la face de cuisson, le repérage de l'échantillon prend en considération l'exposition au nord magnétique. Une convention a été introduite afin de distinguer, dans le matériel cuit de chant ou sur tranche, quelle est la face exposée au nord. Il est en effet possible de différencier sur la pièce une face "inférieure", relativement rugueuse, sur laquelle reposait l'objet lors du séchage, et une face "supérieure" distinguée par des stries de lissage, ou dans le cas des tuiles, distinguée par la présence de crochets ou de rebords.

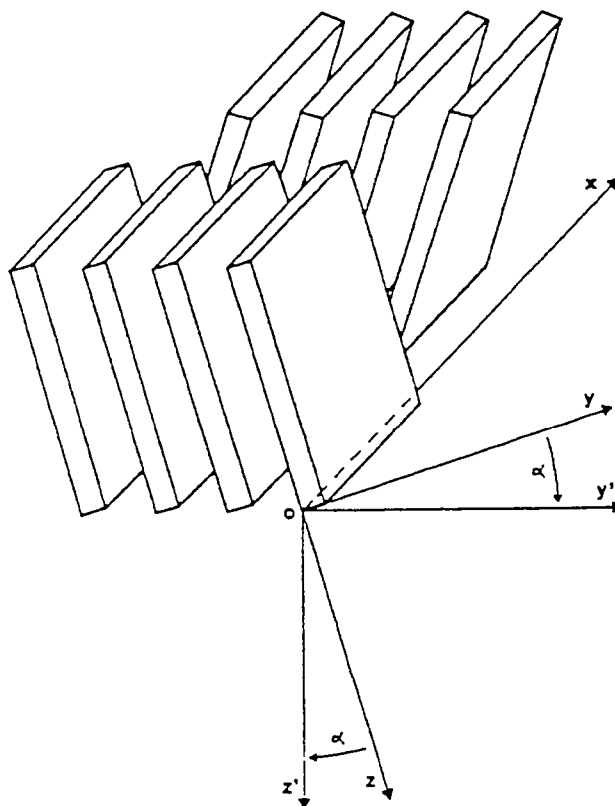
Dans un diagramme I- $\Delta$ , il peut ainsi être figuré l'ensemble des informations recueillies pour chaque objet étudié : inclinaison et déviation, position de cuisson, à plat, de chant ou debout, repérée par des symboles différents, losanges, carrés, triangles, dont la couleur, blanche ou noire, indique une face "inférieure" ou "supérieure" tournée vers le nord.

La possibilité de différencier les groupes présents dans un diagramme I- $\Delta$ , permet d'obtenir une meilleure application de la détermination de l'inclinaison. Le traitement statistique appliqué indépendamment pour chaque groupe, est le même que pour un diagramme Inclinaison-Déclinaison : statistiques de Fisher ou de Mc Fadden. Il y apporte les mêmes avantages et une qualité supérieure de la détermination de l'inclinaison, par rapport à l'usage des histogrammes.

L'utilisation de la déviation a permis d'obtenir des renseignements technologiques sur le chargement des pièces dans le four. On observe fréquemment sur les diagrammes I- $\Delta$  une répartition en deux groupes, disposés avec un écart de déviation de l'ordre de 90°. Cette disposition traduit un chargement des pièces à la perpendiculaire les unes des autres : soit qu'elles aient été placées en damier, soit qu'elles aient été chargées sur des rangées alternées disposées perpendiculairement les unes par rapport aux autres. Dans le but de perdre un minimum d'espace, un tel chargement suggère l'utilisation d'un four rectangulaire (fig. I-26). Pour la même raison, l'hypothèse que les pièces aient été disposées parallèlement aux parois, permettrait de retrouver l'orientation du four par rapport au nord magnétique de l'époque. Une expérience menée sur un lot de carreaux cuits en 1986 a permis de vérifier le fondé de ces suppositions, en comparant les renseignements obtenus au laboratoire et la disposition réelle du four sur le terrain (Lanos, 1987a). Il est à noter que la supériorité en nombre des constructions rectangulaires des fours pour la période gallo-romaine en France est maintenant bien attestée (Le Ny, 1988). Mais il faut rester prudent dans ce genre d'extrapolation car il suffit de charger les pièces perpendiculairement les unes aux autres, dans n'importe quel type de four, rond, ovale, carré, pour avoir une telle distribution dans un diagramme I- $\Delta$ .



a



b

fig. I-27 a et b : diagramme de pointage d'un lot de briques gallo-romaines. On observe pour les fortes déviations, à droite (groupe de points B), un dédoublement des points en deux sous-groupes noirs et blancs. Cette figure trouve son origine dans le pendage alterné des briques lors de leur cuisson. fig. b, interprétation du chargement des briques (Lanos, 1994).

Nous avons parlé précédemment du léger pendage, entre 5 et 10°, donné aux pièces longues pour les caler contre les parois des fours. Cet effet peut être éventuellement détecté dans un diagramme I-Δ de pièces cuites sur tranche (ou de chant). Ainsi, il est parfois remarqué un dédoublement des groupes de points autour d'une valeur centrale, particulièrement visible pour les angles de forte déviation : d'un côté se trouvent les symboles blancs, de l'autre les symboles noirs. C'est le signe que les pièces ont été cuites avec un léger pendage, alterné d'une rangée à l'autre (fig. I-27, a et b). À la valeur moyenne d'inclinaison, le redressement artificiel, lié à l'hypothèse de pièces cuites verticalement, ajoute ou soustrait la valeur du pendage. Cet effet est peu sensible pour les déviations faibles ou nulles, mais devient de plus en plus perturbant au fur et à mesure que la déviation est proche de 90° (Lanos, 1994).

La sensibilité en fonction de l'angle de déviation a aussi été observée pour les autres perturbations. Plus la déviation est faible, et plus le plan d'aplatissement de l'objet est parallèle au nord magnétique et donc moins l'inclinaison est sensible à l'effet de forme. Il en va de même pour l'anisotropie d'ATR. Le plan d'aplatissement correspondant le plus souvent au plan de facile aimantation, les effets de l'anisotropie d'ATR sont moins sensibles dans cette direction.

Suite à ces observations, la détermination de l'inclinaison est préférentiellement réalisée à partir des groupes de données de déviation proche de zéro. Mais de toute façon les techniques de correction des effets perturbateurs existent. Des formules de correction ont été établies pour les cas où les échantillons sont porteurs de fortes aimantations et risquent de subir des effets de forme (Lanos 1987a, 1987b). Les effets de l'anisotropie d'ATR sont systématiquement analysés et corrigés.

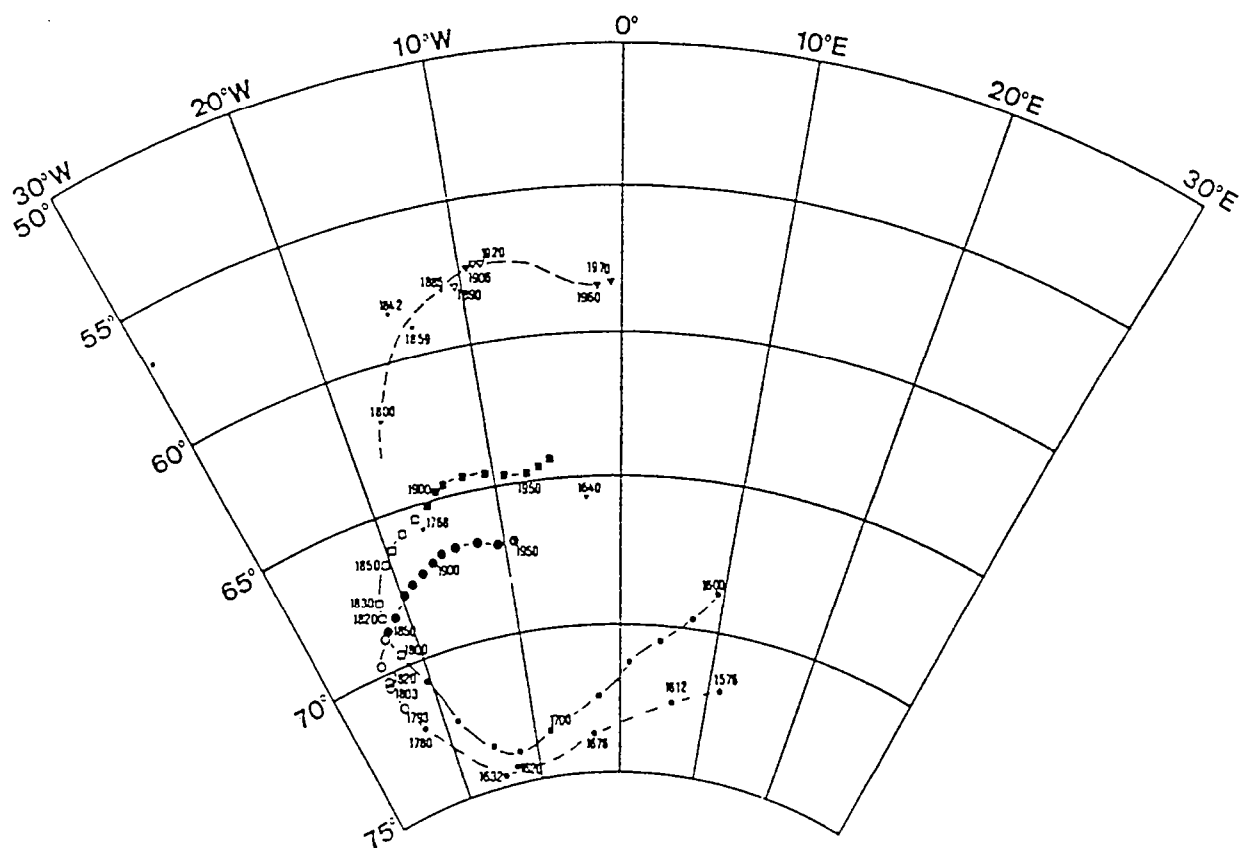


fig. I-28 : variation séculaire de la direction du champ magnétique terrestre. Mesures directes sommaires (en creux) et continues d'observatoires (en plein) aux latitudes de Rome (triangles), Paris (carrés) et Londres (ronds), Thellier 1981.

### I-2-3 Les courbes de variation séculaire de l'inclinaison et de déclinaison en France durant les deux derniers millénaires

Les premiers travaux présentés par Bauer (1899), à partir de la compilation des mesures effectuées par les premiers observateurs, dès le 17<sup>e</sup> siècle, et observatoires, dès le 19<sup>e</sup> siècle, montrèrent l'homogénéité des variations entre Londres, Paris et Rome (cf Thellier, 1981, fig. I-28).

Devant l'absence de données directes pour les périodes plus anciennes, l'archéomagnétisme s'est présenté comme une méthode simple d'investigation de la variation séculaire de l'inclinaison et de la déclinaison dans le passé historique.

#### Travaux de E. Thellier.

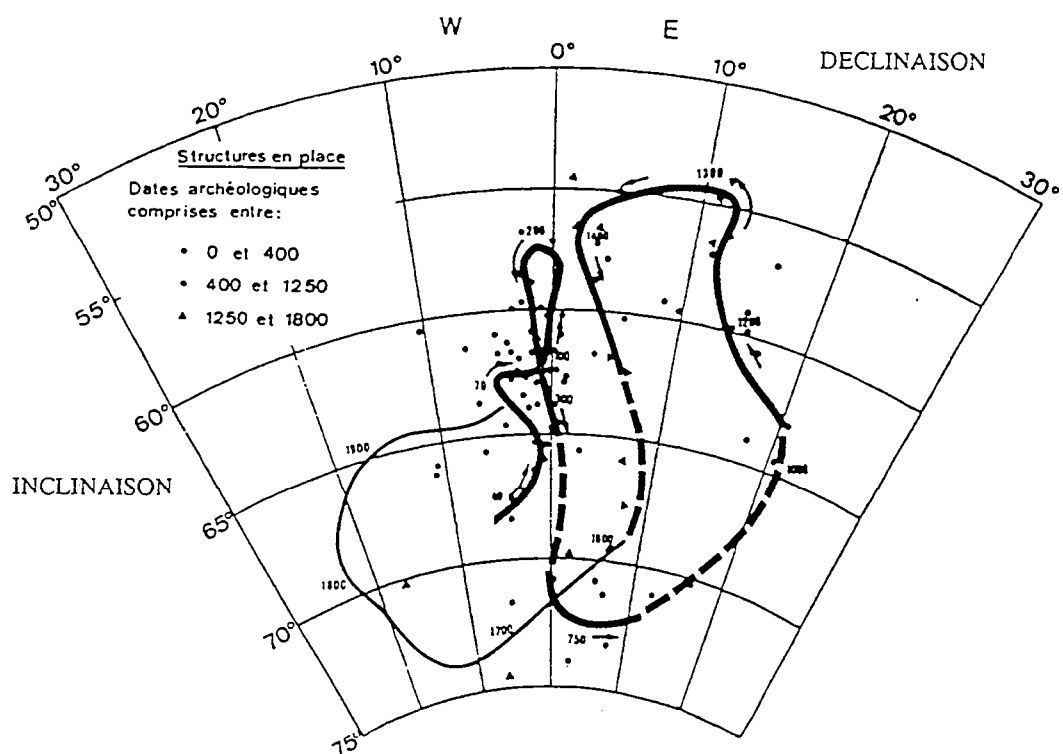
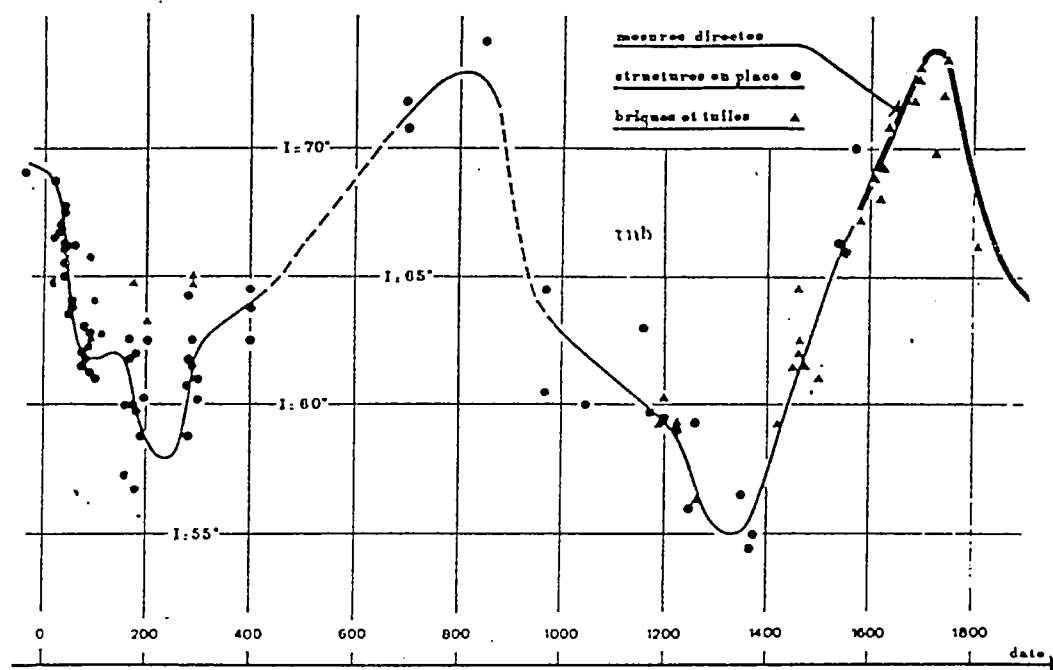
La première référence pour la France est l'ensemble des travaux réalisés par Thellier, dont l'article de 1981 est l'aboutissement.

142 formations prélevées *in-situ* et 32 séries provenant de matériel déplacé ont été utilisées. Dans un esprit de rigueur et afin d'obtenir un maximum de précision, Thellier a rejeté toute estimation effectuée sur une moyenne d'échantillons inférieure à 4, dont l'incertitude sur l'inclinaison ( $\alpha_{95}$ ) est supérieure à 3°, et dont les échantillons présentent une viscosité supérieure à 5%.

Le résultat est une courbe  $I = f(t)$  (fig. I-29-a) qui présente une forte amplitude de variation, entre 55° et 75°, soit de l'ordre de 20°. Cette variation apparaît comme irrégulière avec des maxima situés en 800 ap. J.C. environ et vers 1720 (mesure directe), et des minima placés en 250 et 1350 ap. J.C. Aucune périodicité n'est donc apparente, et les variations s'effectuent de même plus ou moins rapidement sans régularité visible *a priori*. En conclusion, "les champs dipôle et non-dipôle jouent à leur guise, lentement soit mais différemment suivant les époques et les régions du globe, et nous ne pouvons suivre que leur résultante " (Thellier, 1981).

De même que la courbe de variation ne présente pas de marge d'erreur en inclinaison et en âge (la précision de datation donnée par les archéologues ne paraissant alors pas assez fiable), la courbe  $I-D = f(t)$  ne présente pas de marge d'erreur en inclinaison et en déclinaison. Thellier n'en ignore pas le problème pour autant et présente chaque point comme le centre d'une surface d'erreur plus indéterminée en D qu'en I.

L'allure de cette courbe (fig. I-29-b) varie entre 22° Ouest (1815 ap. J.C.) et 22° Est (vers 1000 ap. J.C.) soit une fourchette de 45° environ. De même que dans la courbe de variation de l'inclinaison, aucun cycle régulier n'est apparent. La variation n'est pas répétitive.



En conclusion à ces reconstitutions Thellier a fait quelques remarques :

- durant la période gallo-romaine, la variation de la déclinaison est faible, centrée sur la valeur 0°. De ce fait la connaissance de la déclinaison au site dans cette période n'est pas un facteur discriminant de datation par archéomagnétisme (nous reviendrons sur cette notion par la suite).

- le tracé le plus sûr semble être celui établi pour la période 300 à 700 ap. J.C.

- ne disposant que de peu de données pour les âges 750 à 1000 ap. J.C., le contour de la courbe pourrait être remis en question.

- quelques incertitudes persistent quant à l'âge attribué aux sites datés de 1150 à 1300 ap. J.C.

Par conséquent l'allure de la courbe dans cette période pourrait aussi être modifiée suite à l'obtention de nouvelles données.

## Travaux de I. Bucur

En 1994, en continuité avec les recherches de Thellier, Bucur a présenté la suite des travaux réalisés au Laboratoire de St-Maur des Fossés sur l'archéomagnétisme. 90 nouveaux résultats sont apportés, réalisés à partir de l'étude de matériel de type fours, poterie, mais aussi de foyers domestiques ou de niveaux d'incendies. Celle-ci rappelle, entre autre, les problèmes d'approvisionnement en matériel fiable, avec des fourchettes réduites de datation, et la difficulté à établir un échantillonnage varié sur toutes les périodes historiques.

Une attention particulière a été portée à la méthode de correction liée à la différence de latitudes entre sites. Après plusieurs essais la méthode du pôle géomagnétique virtuel (PGV) reste préférée à celle de la correction de latitude pour un champ dipolaire axial centré.

A la différence de l'article de Thellier 1981, les courbes de variation sont présentées avec leur intervalle de confiance. Elles ont été calculées à l'aide de la méthode statistique bivariante développée par Le Goff (1990).

L'analyse de la courbe  $I = f(t)$  (fig. I-30-a) présente deux maxima, un vers 850 et un vers 1700 ap. J.C. Deux minima se trouvent vers 200 et vers 1400 ap. J.C.

Nous retrouvons là les caractéristiques déjà relevées par Thellier (1981). Il en est de même pour la fourchette de variation comprise entre 54° et 75°. Le traitement statistique et l'augmentation du nombre de données a tendance à lisser les hétérogénéités présentes sur la courbe proposée par Thellier. De ce fait une certaine régularité, entre maxima et minima, apparaît, sans toutefois qu'il soit possible de parler de périodicité.

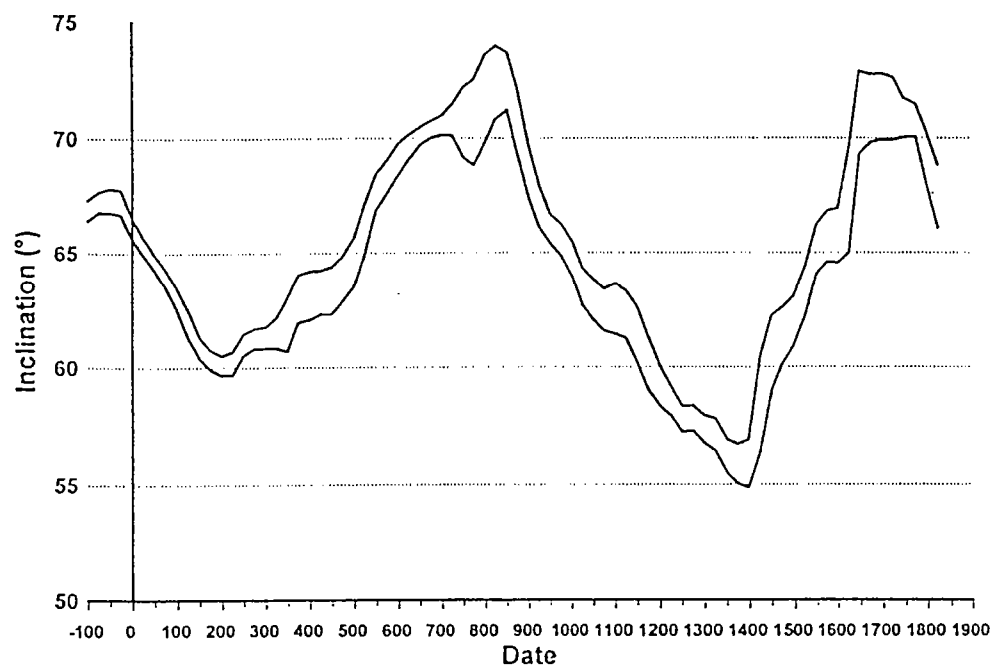


fig. I-30-a : Travaux de Bucur 1994, reconstitution de la courbe de variation séculaire de l'inclinaison.

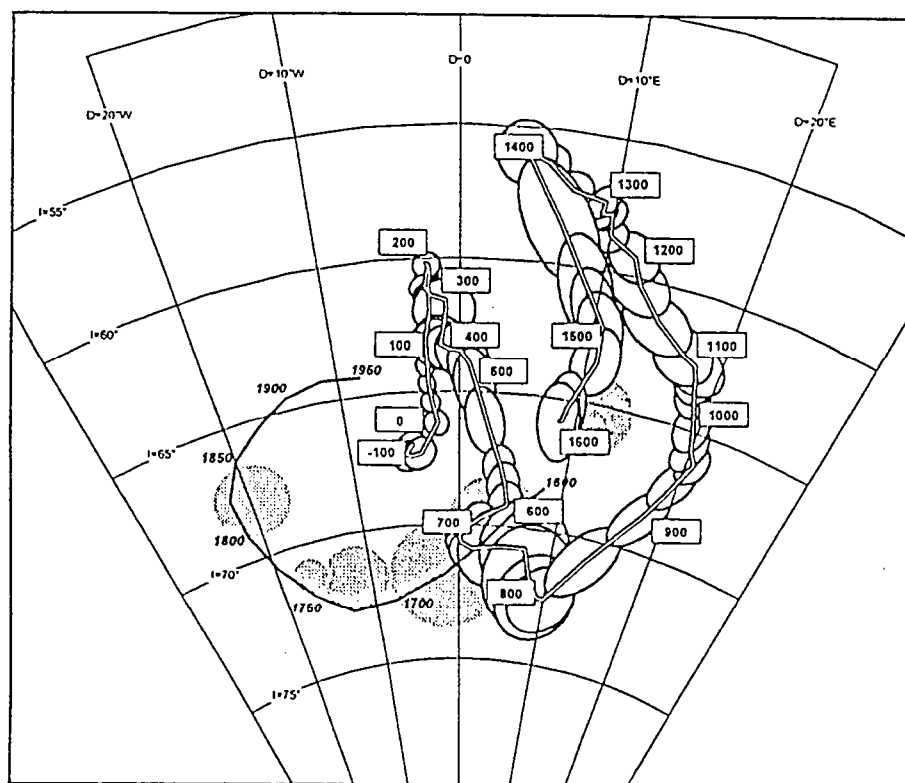


fig. I-30-b : Travaux de Bucur 1994, reconstitution de la courbe de variation I-D = f(t).



La courbe de variation I-D (fig. I-30-b) est proche de celle de Thellier mais on note une franche différence pour la période 1300-1600 ap. J.C. du fait du plus grand nombre de sites. La variation de la déclinaison se situe entre les 22° ouest de 1815 ap. J.C. et la nouvelle valeur de 22° Est entre le dixième et onzième siècle. Cette valeur angulaire est la même que celle estimée par Thellier mais manquant de données celui-ci plaçait l'événement un siècle plus tard.

Ces nouveaux travaux permettent de préciser la courbe de variation de la déclinaison. En fait cette dernière présente pour la période gallo-romaine une déclinaison quasi nulle déjà observée par Thellier. La remarque quant au faible pouvoir discriminatoire de la déclinaison pour la datation archéomagnétique précise dans cette période est donc toujours d'actualité. Le problème est d'autant plus sérieux qu'un désaccord, pour l'interprétation de la courbe de variation de l'inclinaison à la période gallo-romaine, existe avec les résultats du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes.

### Derniers travaux du laboratoire d'Archéométrie de Rennes

Le laboratoire de Rennes s'est spécialisé dans l'étude du matériel déplacé mais se consacre aussi depuis quelques années au matériel *in-situ*. Ainsi 175 analyses ont été réalisées entre 1990 et 1995, dont un tiers de prélèvements orientés sur structures en place (fours, foyers), et deux tiers de prélèvements sur lots de tuiles et briques. 500 analyses sont répertoriées pour la période d'activité de 1980 à 1995 (le corpus d'analyse est en cours de publication par P. Lanos).

Ces travaux ont permis d'apporter de nouvelles données entre autre pour la période gallo-romaine. L'acquisition de ces informations s'est faite avec un maximum de précautions quant au comportement magnétique des échantillons (correction d'effet de forme, et correction d'anisotropie d'ATR, entre autre).

Certains résultats récemment obtenus font apparaître l'existence de fortes valeurs d'inclinaison entre 200 et 300 ap. J.C. Les données, sélectionnées selon des critères tels que la précision de datation ( $\pm 25$  ans), une viscosité inférieure à 4% et un  $\alpha_{95}$  limité à 2.5°, permettent d'établir une courbe présentant une variation en forme de "double oscillation" entre 0 et 450 ap. J.C. (fig. I-31).

Il est notable que Thellier ait présenté une interprétation identique dans ces premiers articles (1971). Mais il ne l'a pas conservée par la suite.

Plus récemment, Kovacheva, en 1994, a présenté une interprétation de la courbe de variation de l'inclinaison depuis deux mille ans en Bulgarie. Le traitement par spline cubique, avec des fenêtres non-chevauchantes de 50 ans, des données d'inclinaison est intéressant car il fait lui aussi ressortir un pic vers 300 ap. J.C. (fig. I-32).

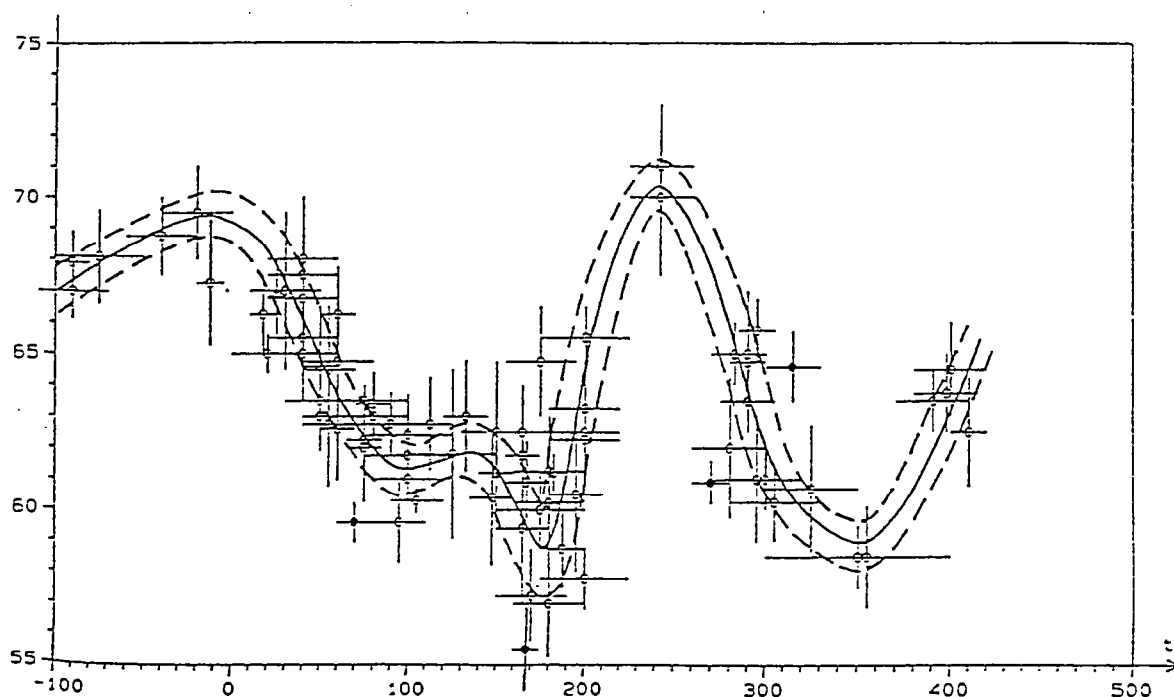


fig. I-31 : travaux du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes. Reconstitution de la courbe de variation séculaire de l'inclinaison pour la période Gallo-romaine (Laubenheimer & Lanos, 1994).

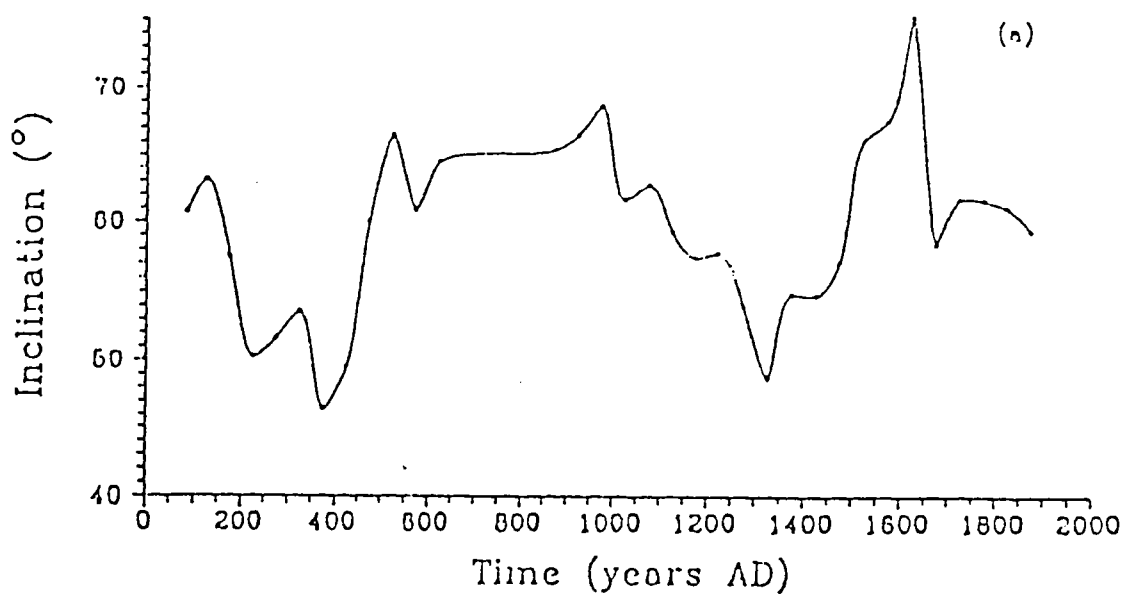


fig. I-32 : travaux de Kovacheva, 1994. Courbe de variation de l'inclinaison, établie pour la Bulgarie (traitement en splines cubiques naturelles, fenêtre de 50 ans).

## I-2-4 Conclusion : possibilités offertes par la datation archéomagnétique

Du fait des caractéristiques de l'ATR, l'événement daté correspond à la dernière acquisition d'aimantation (aimantation totale ou parfois réaimantation). Il s'agit donc d'un *terminus post-quem* (date plancher à partir de laquelle un événement s'est produit) :

- dans le cas de foyer de four, c'est la dernière montée en température qui est datée, celle qui marque l'arrêt de fonctionnement. Aucune information n'est donnée sur la date de fabrication et sur la durée d'utilisation.

- dans le cas de matériel déplacé, la datation concerne la plupart du temps la cuisson des objets (ou quelquefois des événements provoquant une réaimantation, comme un incendie par exemple). S'il s'agit de matériel de construction, celui-ci a pu en théorie être employé bien plus tard, mais nous savons que l'édifice n'a pas pu être bâti avant que les briques soient cuites.

Dans l'absolu, il suffit de comparer la valeur estimée de l'inclinaison, et, quand elle est accessible, de la déclinaison, avec les courbes respectives de variation, pour obtenir une solution de datation.

La fiabilité de la méthode, en datation, est directement reliée à la fiabilité des courbes de variation. Dans la meilleure des configurations possibles, les datations AM actuelles peuvent atteindre une précision de  $\pm 20$  ans.

L'allure des courbes de variation des directions est relativement bien établie. Certaines périodes, continuent cependant à poser des problèmes. Le consensus sur la reconstitution de la courbe de variation de l'inclinaison n'est pas tout à fait réalisé. Il ne devrait l'être que dans la mesure où de nouvelles données pourront infirmer ou confirmer certaines des conclusions actuelles.

En réalité la datation archéomagnétique repose principalement sur la connaissance de l'inclinaison. En effet, la connaissance de la déclinaison n'est pas obligatoirement discriminante (ce qui est particulièrement vrai durant la période gallo-romaine).

Du fait du caractère ondulatoire de la courbe de variation de l'inclinaison, le nombre d'études débouchant sur la proposition de solutions multiples reste donc très élevé.

La décision du choix d'une solution, dans la mesure ou le contexte archéologique du matériel s'y prête, est donc laissée à l'archéologue.

Afin de réduire le nombre de solutions archéomagnétiques, l'étude de la variation séculaire de l'archéointensité du CMT en France est apparue comme une voie potentielle, et logique, pour un laboratoire travaillant sur l'archéomagnétisme.

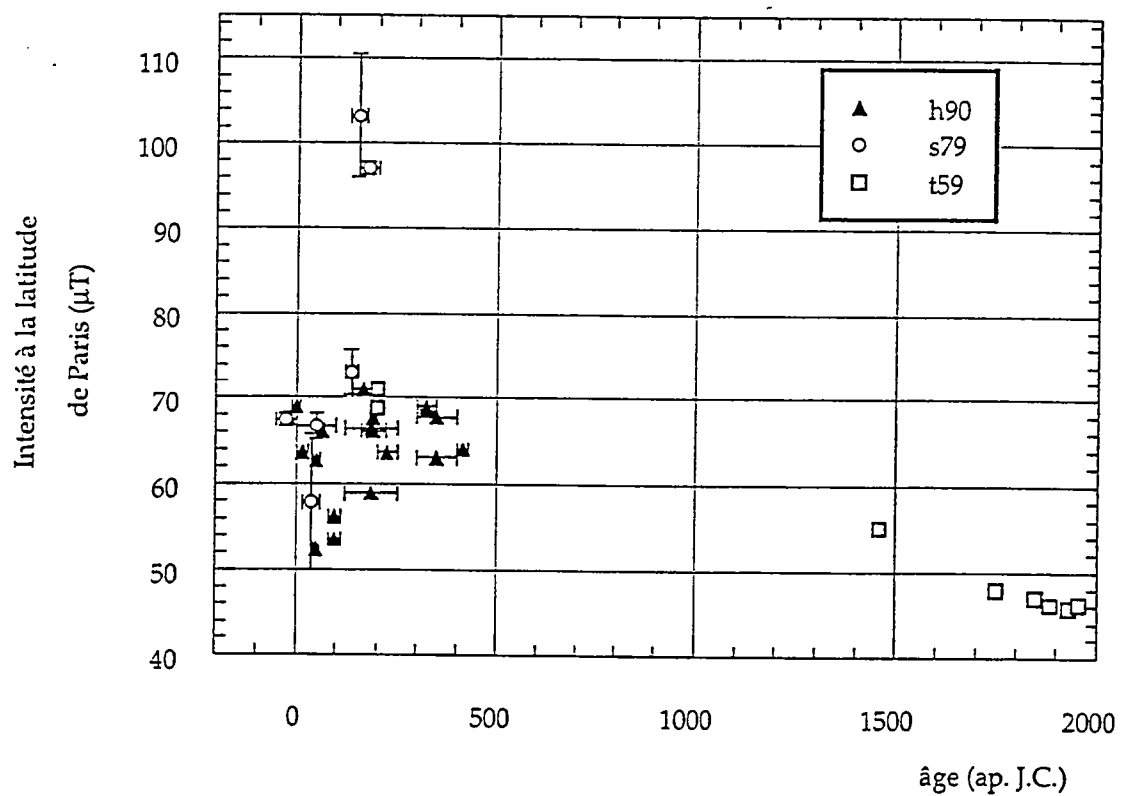


fig. I-33 : compilation des données d'archéointensité pour la France exclusivement, durant les deux derniers millénaires. Triangles noirs, Hedley & Wagner , 1990, cercles, Shaw, 1979, carrés, Thellier & Thellier, 1959. Les données de Barbetti, 1976, provenant du site controversé de Glozel ne sont pas figurées.

## I-2-5 Archéomagnétisme et archéointensité

Outre la possibilité de mémoriser la direction du champ lors du refroidissement, les argiles cuites ont aussi la particularité d'avoir une aimantation proportionnelle à l'intensité du champ d'induction (du moins tant que cette dernière n'est pas trop élevée, comme celle du CMT par exemple). Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur la technique bien développée par Thellier pour arriver à déterminer l'intensité du champ. Mais nous pouvons déjà dire que la procédure mise en oeuvre est un peu plus compliquée que pour une détermination de directions magnétiques.

Si la durée des manipulations est un peu plus longue avant de donner des résultats, la méthode, en théorie, offre l'avantage de pouvoir utiliser des échantillons indépendamment de la connaissance de leur position de cuisson.

Bizarrement pour un pays qui a vu se mettre en place, dès 1959, une méthode fiable de détermination de l'intensité (Thellier & Thellier, 1959), la France est une région relativement peu étudiée. Outre les travaux de Thellier, dont l'article de 1959 présente l'achèvement en ce qui concerne l'intensité, peu d'auteurs ont publié sur ce thème. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer Veitch, Hedley et Wagner en 1984, Hedley et Wagner en 1990, Barbetti en 1976 et Shaw en 1979, soit cinq publications en comptant celle de Thellier & Thellier 1959 (nous développerons cette analyse dans le dernier chapitre). La compilation de ces travaux présente près d'une quarantaine de données réparties en majorité dans la période Gallo-romaine (fig I-33).



## **Chapitre II**

### **Méthodologie de l'archéointensité**

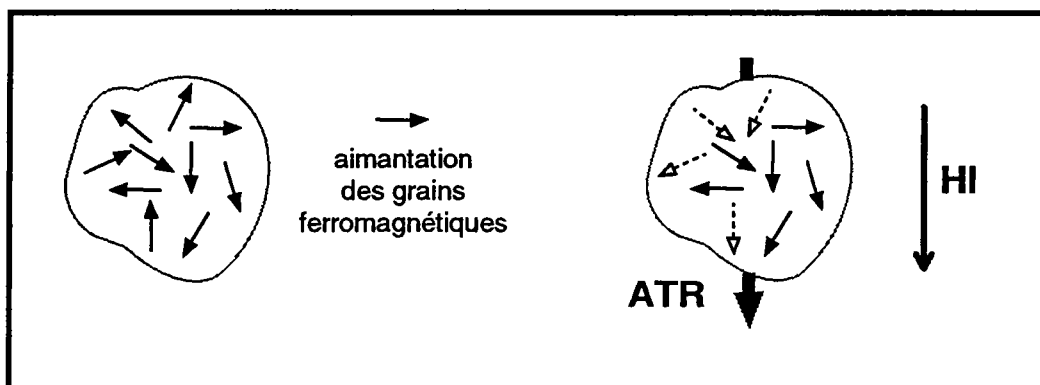


fig. II-1 : modélisation de l'acquisition d'une ATR. L'aimantation portée par chaque grain tend à s'aligner dans la direction du champ magnétique  $H_I$ , créant suite au refroidissement une aimantation rémanente dirigée selon le sens du champ.

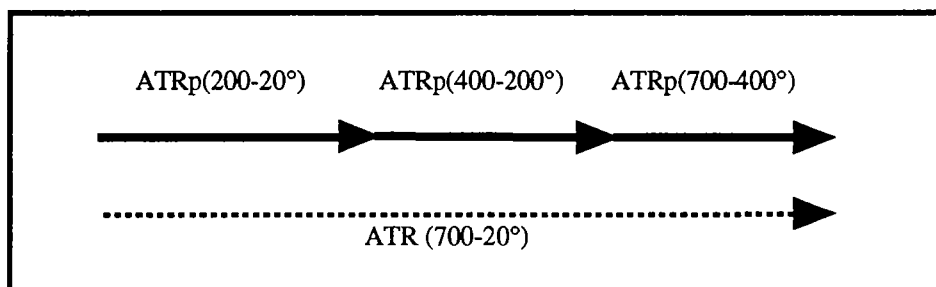


fig. II-2 : Loi d'addition des  $ATRp$ . L'aimantation totale mesurée est la somme vectorielle des aimantations partielles acquises sur diverses gammes de température.



## **II Méthodologie de l'archéointensité**

Nous avons évoqué dans le chapitre précédent les principes de base de l'archéomagnétisme appliqués à la détermination des directions anciennes du CMT.

Nous allons maintenant nous intéresser aux techniques employées afin de déterminer l'intensité du CMT dans le passé.

Ce chapitre est articulé sur quatre thèmes : méthode de Thellier-Thellier 1959, étude de l'effet des atmosphères de chauffe sur le comportement magnétique des échantillons, étude des effets de l'anisotropie d'ATR et étude des effets liés aux différentes vitesses de refroidissement.

### **II-1 Rappels sur la méthode de détermination de la paléointensité**

#### **II-1-1 Propriétés de l'aimantation thermorémanente**

Outre le fait de pouvoir mémoriser les directions du CMT (fig. II-1), l'ensemble des grains ferromagnétiques, entrant dans la composition de la pâte argileuse, présentent d'autres propriétés toutes aussi intéressantes :


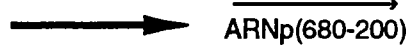
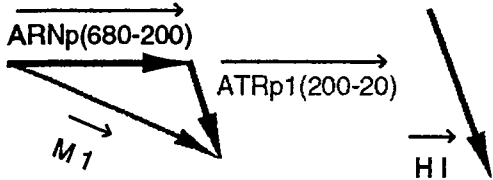

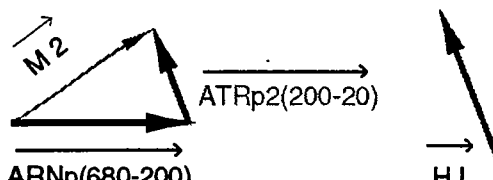
- l'aimantation totale des terres cuites, acquise lors du refroidissement entre deux températures  $T_{max}$  et  $T_{min}$ , peut être décomposée comme la somme vectorielle des aimantations thermorémanentes partielles (ATRp) acquises sur des intervalles de température, compris entre  $T_{max}$  et  $T_{min}$  (fig. II-2). Cette propriété, mise en évidence dès 1938 par Thellier, est appelée loi d'additivité des aimantations thermorémanente.

- l'ATR, acquise dans les terres cuites, est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique présent, tant que celui-ci reste faible ( $<100\mu T$ ). C'est la proportionnalité de l'aimantation au champ.

#### **II-1-2 Méthode de Thellier-Thellier 1959**

En 1959, Thellier et Thellier, présentèrent une méthode de détermination de la paléointensité reposant sur ces deux propriétés.

Celle-ci nous est apparue comme la plus fiable, nous expliquerons pourquoi, pour être utilisée sur nos échantillons de terre cuite.

a	champ de laboratoire	T°	Etat
	nul	20°C	Aimantation ThermoRémnante Ancienne (ARN) à 20°C
	nul	200°C	ARN à 200°C
	intensité HI	20°C	1er refroidissement : acquisition d'une aimantation thermorémnante ATRp(200-20) $\vec{M1} = \vec{ARNp(680-200)} + \vec{ATRp1(200-20)}$
	nul	200°C	ARN à 200°C
	HI, inversé	20°C	2ème refroidissement : $\vec{M2} = \vec{ARNp(680-200)} + \vec{ATRp2(200-20)}$

relations :

$$\frac{(\|\vec{M1}\| + \|\vec{M2}\|)}{2} = \text{ARNp}(680-200)$$

$$\frac{(\|\vec{M1}\| - \|\vec{M2}\|)}{2} = \text{ATRp}(200-20)$$

$$\frac{\Delta(\text{ARN})}{\Delta(\text{ATR})} = \frac{\text{intensité champ ancien}}{\text{intensité champ laboratoire}}$$

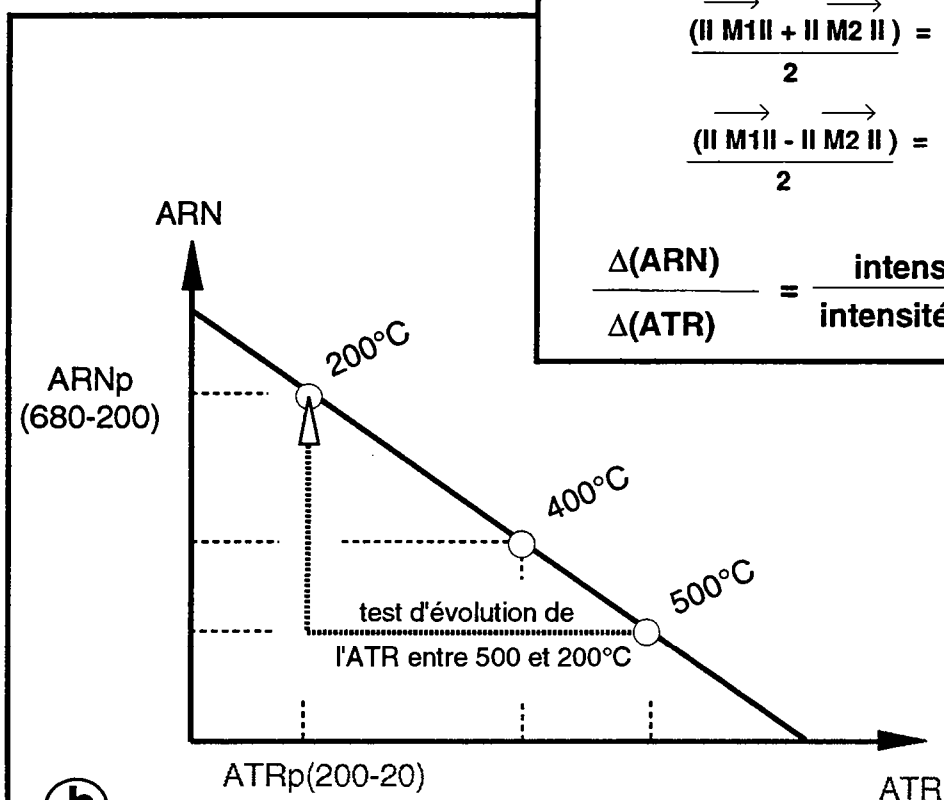


fig. II-3 : principe de la méthode de THELLIER-THELLIER (1959). Procédure d'acquisition et mesure des ARNp et ATRp, formules de calcul et diagramme d'Arai permettant de visualiser la relation  $\text{ARNp} = f(\text{ATRp})$ , ainsi que les tests d'évolution par acquisition d'ATR partielle.

Son principe est le suivant (fig. II-3-a):

- soit un échantillon dont on mesure, à la température ambiante de 20°C environ, l'ATR acquise antérieurement (lors du refroidissement depuis une température élevée, 700°C par exemple, jusqu'à la température ambiante). Cette aimantation, mesurée avant toute intervention au laboratoire, sera qualifiée d'Aimantation Rémanente Naturelle (ARN). Par commodité, dans le développement qui suit, cette ARN est considérée comme uniquement d'origine thermorémanente et acquise en une seule fois.

- cet échantillon est par la suite réchauffé, par exemple à 200°C. Il conserve une partie de son aimantation, ARNp(700-200), portée par les grains de température de blocage supérieure à 200°C.

- refroidi jusqu'à 20°C, dans un champ magnétique d'intensité connue (champ de laboratoire Hl, par exemple), il acquiert une ATRp, ATRp1(200-20), dont l'intensité est proportionnelle au champ Hl et de même sens.

- l'aimantation M1 mesurée à 20°C sera la somme vectorielle de l'ARN conservée à 200°C, ARNp(700-200), et l'ATR acquise entre 200 et 20°C, ATRp1(200-20).

- si l'échantillon est maintenant réchauffé à 200°C il perd son ATRp1(200-20). Refroidi dans le champ Hl, de sens inversé cette fois, il acquiert une nouvelle ATRp2(200-20) de sens inverse à la précédente, de même intensité que ATRp1(200-20).

- mesurée à 20°C cette nouvelle aimantation M2 sera la somme vectorielle de l'ARNp(700-200) et de la nouvelle ATRp2(200-20).

Grâce à ces deux aimantations M1 et M2 il est possible de déterminer les caractéristiques de l'ARNp(700-200) et de l'ATRp(200-20).

En effet :

$$\frac{\vec{M1} + \vec{M2}}{2} = \vec{ARNp(700-200)}$$

*f II-1*

et,

$$\frac{\vec{M1} - \vec{M2}}{2} = \vec{ATRp(200-20)}$$

*f II-2*

En l'absence de problèmes durant l'expérimentation (altération de l'échantillon entre autre), les points de coordonnées (ARNp conservée, ATRp acquise), obtenus pour chaque nouveau palier de température, se répartissent, dans un diagramme ARNp en fonction de l'ATRp, selon une droite (fig. II-3-b).

La valeur de l'intensité du champ présent lors de l'acquisition de l'aimantation ancienne peut alors être déduite grâce à la loi de proportionnalité de l'aimantation au champ. Connaissant la valeur de

la pente de la droite  $\{\Delta(ARNp) / \Delta(ATRp)\}$ , ainsi que la valeur de l'intensité du champ de laboratoire (HI) il est possible de résoudre l'équation suivante :

$$\boxed{\frac{\Delta(ARNp)}{\Delta(ATRp)} = \frac{\text{Intensité champ ancien}}{\text{Intensité champ laboratoire}}} \quad f.II-3$$

### Qualités et inconvénients de la méthode Thellier-Thellier

Cette méthode présente plusieurs qualités :

- les processus d'acquisition de l'aimantation mis en jeux sont les mêmes que lors de l'acquisition de l'aimantation ancienne : il s'agit toujours d'aimantation thermorémanente,

- il est possible, grâce à la loi d'additivité, de tester la capacité d'acquisition de l'ATR sur diverses gammes de température, en cours de chauffe. Il suffit, après avoir chauffé l'échantillon à une température T, d'acquérir une nouvelle ATRp, en réchauffant l'échantillon à une température test, Tt (Tt<T), choisie égale à une température de palier Tp précédemment utilisée pour les calculs {ARNp, ATRp(Tp)}. Cette nouvelle ATRp(Tt) peut alors être comparée à ATRp(Tp). Ce test (connu sous le nom de test de Thellier) permet de détecter toute évolution éventuelle durant l'expérimentation,

- si cette dernière vient à être décelée, l'acquisition par paliers de température croissante des couples de valeurs (ARNp/ATRp), permet de conserver les résultats obtenus avant cette évolution. Ceci est un net avantage sur les méthodes de détermination de l'intensité passant par une désaimantation complète de l'échantillon, en une seule et unique chauffe (cf. chapitre V, méthode Shaw ,1974, par exemple.). Dans cette méthode sont conservées les portions d'ARN et ATR portées par des grains dont le champ coercitif (champ magnétique qui appliqué à l'échantillon permet de renverser le sens de l'orientation) reste inchangé après l'unique chauffe d'acquisition d'ATR (les spectres de champ coercitif sont obtenus par désaimantation par champ alternatif). Le critère de comparaison utilise donc les caractéristiques de champ coercitif des grains et non directement leur température de blocage. Vu les difficultés parfois rencontrées pour connaître la totalité des spectres de champ coercitif, les appareils de désaimantation par champ alternatif ne permettant que de désaimanter une portion de l'aimantation, la méthode de Thellier, qui permet de toucher tout le spectre de températures de blocage, nous semble plus fiable.

L'inconvénient principal reste de devoir exposer les échantillons à des chauffes répétées, multipliant chaque fois le risque d'évolution physico-chimique. Les terres cuites ayant, pour la grande majorité des cas, subi une cuisson à forte température (de 1000 à 1200°C afin d'obtenir une bonne tenue mécanique), les minéraux magnétiques présentent souvent une bonne stabilité aux expositions thermiques nécessaires à la détermination de l'intensité, dans des températures qui ne dépassent pas les 700°C.

La mise en oeuvre de la méthode, simple à priori, n'évite pas toutefois d'avoir à exécuter des tests supplémentaires. Il faut, pour obtenir les résultats les plus fiables possibles, tenir compte des caractéristiques magnétiques des minéraux ferromagnétiques présents dans les échantillons. Nous avons déjà évoqué des phénomènes tels que l'anisotropie d'ATR, ou les problèmes d'effet de forme. Ces derniers ne seront pas traités ici, car chaque fois que c'était possible, nous avons sélectionné des échantillons non sujets à l'effet de forme. Par contre nous verrons que l'effet de l'anisotropie d'ATR est omniprésent dans nos échantillons. L'effet des vitesses de refroidissement sur l'acquisition de l'ATR sera aussi étudié.

Nous allons, dans un premier temps, nous intéresser à la capacité d'évolution minéralogique de nos échantillons de terre cuite, du fait des chauffes répétées imposées par la méthode que nous avons choisie.

## II-2 tests et choix d'une atmosphère de chauffe

Dès les premiers essais de détermination de l'intensité, à partir de l'étude de l'ATR des roches ou des terres cuites, les chercheurs se sont trouvés confrontés au problème de l'évolution minéralogique des porteurs magnétiques, au cours des chauffes.

Diverses voies ont été explorées afin de réduire ce problème :

- on a ainsi cherché à réduire le nombre de chauffes, jusqu'à un strict minimum. La méthode de Shaw 1974, par exemple, comporte une seule chauffe, totale, jusqu'à 700°C. Le risque de voir une évolution incontrôlée est très élevé,

- Thellier & Thellier (1959), nous l'avons vu, ont proposé une méthode à chauffes multiples, avec montée en température par paliers progressifs et la possibilité de tester la stabilité de la capacité d'acquisition d'aimantation,

- au lieu de réduire le nombre de chauffes, on a aussi cherché à en diminuer la durée, par l'utilisation d'échantillons de taille réduite qui atteignent rapidement l'équilibre thermique. Ce qui a été rendu possible par l'emploi de magnétomètres de type cryogénique (Walton, 1977, Rogers & al., 1979, Aitken & al., 1981, Shaw & Share 1984, par exemple),

- dans le même esprit, les dernières recherches se sont même penchées sur l'utilisation d'un four à micro-ondes (Walton, 1993) dont les premiers résultats expérimentaux ont été publiés il y a peu (Shaw & al., 1996).

Peu de travaux, semble-t-il, ont tenté d'étudier l'influence de l'atmosphère dans laquelle est réalisée la chauffe en laboratoire et la majorité de ceux-ci restent concentrés sur la tenue thermique des roches basaltiques (Khodair et Coe, 1975, Kono et Tanaka, 1977).

## II-2-1 Le problème de l'atmosphère de chauffe, dans les expériences de détermination de la paléointensité, à travers divers auteurs

### Atmosphères de chauffe et paléointensité

Lors de ses premiers travaux, Thellier, en 1938, a effectué quelques expériences à propos de l'effet de l'atmosphère gazeuse sur les réaimantations des terres cuites. Sa première conclusion est que recuites dans des conditions identiques aux conditions initiales (Thellier a lui même cuit une partie de ses échantillons) les terres cuites paraissent stables. Ayant surtout étudié la réchauffe en atmosphère neutre d'azote, sa seconde conclusion est que les échantillons ont deux comportements par rapport à ce gaz :

- s'ils ont été cuits en atmosphère oxydante ou neutre ils peuvent alors être qualifiés de magnétiquement stables,
- s'ils ont été cuits en atmosphère réductrice (gaz de ville), ils deviennent instables lorsqu'ils sont réchauffés en atmosphère neutre.

En 1966, Weaver a présenté le résultat de ses essais : ses échantillons de terres cuites étaient placés dans un four à chauffage au gaz. Dans un premier temps les échantillons furent chauffés en atmosphère d'azote : ils présentèrent alors des évolutions importantes de l'aimantation et de la susceptibilité magnétique. Une deuxième série fut alors testée, avec une atmosphère d'air pulsé. Mais cet essai ne semble pas avoir été particulièrement concluant, certains échantillons restant instables.

En 1975, Khodair et Coe, qui travaillaient sur des échantillons de lave, publièrent leurs travaux sur l'utilisation du vide comme atmosphère stabilisatrice pour les échantillons à minéraux de points de Curie bas ou intermédiaires. L'utilisation d'un vide poussé à  $10^{-5}$  Torrs dans leurs expériences permit d'éviter les phénomènes d'oxydation habituellement rencontrés dans ce type de roche lors de chauffés à l'air.

Kono et Tanaka (1977), observèrent, pour des échantillons de laves basaltiques, des variations d'intensité d'ATR, provoquées par l'emploi de différentes pressions partielles d'oxygène durant la chauffe : l'aimantation rémanente a tendance à s'accroître avec une chauffe de type oxydante et, inversement, à diminuer dans une atmosphère de type réductrice. L'estimation de l'intensité, qui dépend directement de la stabilité magnétique de l'échantillon, est donc grandement influencée par le choix du paramètre atmosphère de chauffe. La nécessité d'un contrôle indépendant de l'évolution (type test de Thellier) en est d'autant plus évidente.

Un essai d'emploi du vide (1 Torr) sera tenté sur les terres cuites par Sternberg en 1989. Devant la difficulté à obtenir une bonne valeur de vide (difficulté attribuée à la grande porosité des échantillons), cette technique sera abandonnée au profit de l'air. Devant l'absence de commentaires, nous pouvons supposer que ce choix a donné de bons résultats.

Nous pouvons déplorer le fait que peu d'articles, traitant d'archéointensité des terres cuites, mentionnent l'atmosphère sélectionnée pour les chauffés. Toutefois, parmi les exceptions (Aitken & al., 1986, Yang & al., 1993a, Hedley & Wagner, 1990, ...) c'est l'atmosphère libre, à l'air, qui est choisie, suivant le raisonnement que les terres cuites sont majoritairement cuites à l'air, en atmosphère oxydante et qu'ainsi la minéralogie résultante est plus stable dans cet atmosphère.

## Analyse archéologique et ethnographique des atmosphères de cuisson

Le raisonnement précédent est-il fondé ? Nous pouvons trouver certains renseignements dans les études ethnographiques et dans les reconstitutions de cuisson.

La connaissance de l'atmosphère de cuisson d'un four peut par exemple être effectuée à partir des analyses in-situ des gaz, lors des cuissons expérimentales dans des fours reconstitués comme les fours de type gallo-romain de Boston (Lincolnshire, Mayes 1962). L'analyse des oxydes de fers contenus dans les pâtes céramiques (spectres Mössbauer), semble aussi efficace.

A partir des expériences de reconstitution (White & White, 1961, White & White, 1962), il a été conclu que la technique la plus efficace pour obtenir une atmosphère réductrice durant la chauffe consiste à provoquer une combustion rapide du bois, laquelle est vorace en oxygène et induit une baisse de la pression partielle de ce gaz. Mais cette technique a pour inconvénient d'entraîner une forte élévation de la température, ce qui n'est peut-être pas l'effet recherché par le potier. A contrario la baisse de combustion s'accompagne d'une élévation de la teneur en oxygène de l'atmosphère du four.

Au refroidissement, une bonne réduction peut être obtenue en fermant toutes les ouvertures de façon la plus étanche possible, ce qui est plus facile à dire qu'à faire, les fours ayant naturellement tendance à se craqueler et à "fuir" au fur et à mesure des cycles de chauffe.

Il semble donc à priori plus aisé de faire fonctionner un four en atmosphère oxydante qu'en atmosphère réductrice.

Les analyses Mossbauer permettent par l'analyse du rapport de concentration en  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , de faire des propositions quant aux conditions atmosphériques de chauffe :

- des fortes concentrations de fer  $\text{Fe}^{2+}$  sont indicatrices de cuisson en condition réductrice (Tominaga & al, 1978),
- des rapports intermédiaires (80% de  $\text{Fe}^{3+}$ , 20% de  $\text{Fe}^{2+}$  par exemple) sont attribués à une atmosphère partiellement réductrice (Janot & Delcroix, 1974).

Ces analyses permettent aussi de connaître la minéralogie magnétique. Sont ainsi trouvées :

- de la goéthite dans les sols non chauffés (Longworth & Tite, 1977),
- de la maghémite impure pour des sols cuits dans un mélange azote-air,

- de la magnétite plutôt que de l'hématite dans des cuissons apparemment réductrices (Ramaswamy & al., 1989),

Nous ignorons quelles sont les conditions de cuisson des lots que nous étudions, et celles-ci, d'après les analyses présentées ici, semblent pouvoir être très variées. Nous allons donc essayer de déterminer quelle est l'atmosphère de chauffe en laboratoire qui présente le moins de risque d'évolution en général.

## II-2-2 Tests de différentes atmosphères de chauffe

Nous avons décidé de tester quatre types "d'atmosphères" :

- le vide, poussé à  $10^{-2}$  mbar,
- l'air libre,
- de l'azote, envoyé après chacune des trois mises sous vide des tubes où sont placés les échantillons, ceci avant que la chauffe débute,
- de l'azote toujours, mais en pseudo-circulation, l'arrivée et le départ de gaz se faisant du même côté, l'autre extrémité étant le fond du tube. Avant que la circulation ne soit mise en place, un vide léger ( $<10^{-2}$  mbar) est effectué dans le tube afin de supprimer le maximum d'air.

Le matériel que nous avons utilisé est "moderne". Il s'agit soit de carottes extraites de carreaux cuits en 1986 dans la briqueterie Cailleau, aux Rairies (Maine et Loire, 49), soit de carottes extraites de petites briquettes (7.5 x 5.8 x 1.6 cm) cuites en 1991, dans un four reconstitué sur le site gallo-romain de Sallèles d'Aude, près de Narbonne (11). Les deux fours fonctionnent en brûlant du bois. Nous sommes donc dans des conditions similaires aux cuissons anciennes. En utilisant du matériel moderne nous avons l'avantage de connaître les directions et intensités du CMT présent durant la cuisson.

Les chauffes sous vide et à l'air libre ont été appliquées sur les deux lots d'échantillons. Les atmosphères azotées n'ont été testées que sur Sallèles d'Aude.

Pour achever ces essais d'atmosphères de chauffe nous nous intéresserons aux intensités déterminées, ainsi qu'au comportement des échantillons lors des tests de balance de Curie, sous vide ou à l'air.

Les tests de Thellier, sont utilisés comme indicateurs de l'évolution de la minéralogie magnétique.

Le résultat de ces contrôles peut être présenté sous deux formes :

- nous pouvons calculer l'évolution entre la première ATR, (ATR1), et la seconde, (ATR2), en la rapportant à la valeur de la première. Nous avons alors l'évolution sur le spectre de température [température de pièce-température de test]. Celle-ci peut être qualifiée de partielle car la fraction de



spectre concernée n'est pas représentative de la totalité du spectre des températures de blocage de l'échantillon.

$$Ep = \text{évolution partielle} = \frac{ATR2 - ATR1}{ATR1} \quad f II-4$$

Aussi dans la seconde présentation l'évolution est cette fois rapportée à la valeur maximale de l'ATR atteinte en fin d'expérience.

$$Er = \text{évolution relative} = \frac{ATR2 - ATR1}{ATR \text{ maximale atteinte}} \quad f II-5$$

Aux tests de Thellier nous avons rajoutés les tests de bouclage : après avoir donné une série d'aimantations à la même température dans différentes directions de l'échantillon (ceci pour déterminer l'anisotropie d'ATR), la première ATR (ATRp) est comparée à la dernière (ATRd). Les valeurs de bouclage peuvent être présentées soit rapportées à la valeur de la première ATR (formule similaire à celle d'Ep),

$$Bp = \frac{ATRd - ATRp}{ATRp} \quad f II-6$$

soit rapportées à la valeur maximale d'ATR acquise, dans la même direction de bouclage (les problèmes liés à l'anisotropie d'ATR sont ainsi évités), mais lors d'une réaimantation à une température supérieure (formule équivalente à celle d'Er).

$$Br = \frac{ATRd - ATRp}{ATR \text{ maximale atteinte}} \quad f II-7$$

#### A) Les Rairies : comparaisons chauffés sous vide / chauffés à l'air

Nous allons ici uniquement comparer les tests de bouclage. Les tests de Thellier n'ayant pas porté sur une température supérieure à 100°C, pour les échantillons chauffés à l'air, nous les jugeons pas assez représentatifs du spectre complet des températures de blocage.

Les échantillons utilisés à chaque détermination (air ou vide) sont différents, mais extraits des mêmes carreaux (numérotation : lot, RAI, suivi du numéro de carreau, par exemple RAI-39). De légères différences de comportement peuvent donc apparaître qui seraient liées non pas à une évolution mais à la différence de la minéralogie entre un premier et un second carottage.

Les résultats sont regroupés dans le tableau II-1.

T	200°C				360°C				530°C	
	Air		Vide		Air		Vide		Air	Vide
échantillon	Bp	Br	Bp	Br	Bp	Br	Bp	Br	Bp = Br	Bp = Br
RAI-39	-3.9	-1.9	0.2	0.1	-0.5	0.4	1.2	0.9	0.3	3.6
RAI-41	-2.1	-0.7	-3.0	-0.6	0.1	0.1	-1.2	-0.4	1.3	19.2
RAI-45	-2.0	-0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	-0.5	-0.3	2.9	5.6
RAI-46	-2.4	-0.7	0.2	0.1	-1.3	-1.1	-3.9	-1.7	3.5	10.7
RAI-71	-0.6	-0.4	-0.9	-0.5	-3.1	-2.9	-1.8	-1.3	3.4	1.5
RAI-73	0.8	0.5	4.4	1.5	-4.8	-4.3	-28.1	-9.7	5.2	22.7
RAI-75	-1.2	-0.7	-2.3	-1.4	-5.1	-4.7	-1.5	-1.2	3.5	0.9
RAI-77	1.5	0.8	-7.4	-1.9	-4.8	-4.1	-27.1	-7.3	3.7	32.1
RAI-78	2.0	1.0	-0.8	0.2	-5.2	-4.4	3.7	3.7	1.1	51.1
RAI-91	6.7	2.7	-1.4	-0.5	-5.3	-4.7	-0.8	-0.8	2.3	9.2
moy. :	2.3	1.6	2.1	0.7	3.0	2.7	8.6	2.7	2.7	15.7
(des val. abs.)	en %		en %		en %		en %		en %	en %

tableau II-1 : résumé des tests de bouclage d'anisotropie des échantillons des Rairies (chauffe à l'air libre et sous vide). échantillon, référence de l'échantillon, T, température à laquelle est calculée l'anisotropie, Bp, évolution partielle mesurée au bouclage, BR, évolution rapportée à l'aimantation maximale acquise à 530°C (voir texte).

Quelle que soit la condition de chauffe choisie, les tests de bouclage à basse température ne présentent pas de valeurs moyennes importantes. Par contre nous constatons pour certains échantillons chauffés sous vide, de fortes évolutions (jusqu'à 51%) à moyenne et haute température, qui ne sont pas retrouvées pour les échantillons "frères" chauffés à l'air.

## B) Sallèles d'Aude expérimental

Comme les briquettes sont petites, seuls deux échantillons ont pu être extraits, un utilisé pour les mesures de directions, l'autre pour nos tests. Les comparaisons se feront donc avec des échantillons totalement différents. On sera donc plus attaché au comportement moyen des groupes constitués qu'au comportement particulier de chaque échantillon. Toutefois les groupes sont de petite taille, 6 échantillons, dont chacun a une grande influence sur les résultats du lot (tableau II-2).

L'atmosphère d'azote après mise sous vide donne ici les meilleurs résultats à basse et haute température, alors que l'atmosphère d'air libre est plus efficace en température moyenne. En conclusion à ces essais nous dirons que les valeurs des tests de Thellier sont faibles dans tous les cas. Les résultats des bouclages d'anisotropie sont inférieurs à 5% en moyenne. Il est difficile de trancher sur le choix d'une méthode plus qu'une autre. L'atmosphère d'air libre présente des résultats moyens, surtout à hautes températures, mais il est impossible de dire si les échantillons 11sal-e1-40b et 11sal-e1-41b n'auraient pas donné les mêmes résultats suite à une chauffe avec une autre atmosphère.

	260-100 °C		410-200°C		410-300°C		480-410 °C		480°C
échantillon	Ep	Et	Ep	Et	Ep	Et	Ep	Et	Bp
Vide									
11sal-e1-25b	10	1	5	1	6	3	-1	0	3.1
11sal-e1-27b	8	1	-10	-2			-1	-1	2.9
11sal-e1-33b	-19	-2	8	1	6	2	-1	0	4.0
11sal-e1-35b	-42	-4	-3	-1	6	2	0	0	7.8
11sal-e1-38b	-18	-3	5	2	2	1	-2	-1	3.3
11sal-e1-44b	-19	-2	5	1	0	0	-3	-3	4.7
moy. :	19.3	2.2	6	1.3	4	1.8	1.5	0.5	4.3
air libre									
11sal-e1-21b	-15	-1							8.4
11sal-e1-22b	-13	-1	7	1	9	3	0	0	5.1
11sal-e1-28b	-31	-3	3	1	1	0	-1	-1	2.4
11sal-e1-29b	-24	-2	3	1	2	1	-5	-3	2.7
11sal-e1-40b	-24	-3	5	1	1	1	-9	-7	3.8
11sal-e1-41b	-30	-4	6	2	2	1	-16	-11	2.1
moy. :	22.8	2.3	4.6	1.2	2.8	1.2	6.2	4.4	4.1
circulation d'azote									
11sal-e1-24b	-2	0	14	3	3	1	-3	-2	2.0
11sal-e1-26b	-9	-1	11	2	3	1	-2	-1	2.0
11sal-e1-32b	19	1	19	4	7	3	-1	-1	3.8
11sal-e1-34b	25	2	13	2	0	0	2	1	6.7
11sal-e1-37b	-2	0	6	2	0	0	1	1	5.6
11sal-e1-39b	-15	-2	6	1	1	0	0	0	3.5
moy. :	12	1	11.5	2.3	2.3	0.8	1.6	1.2	3.9
vide et azote									
11sal-e1-6b	4	0	9	2	4	2	-1	-1	2.2
11sal-e1-30b	4	0	14	3	4	2	-1	-1	0.5
11sal-e1-31b	9	1	12	2	4	1	1	1	0.8
11sal-e1-42b	-6	-1	6	1	4	1	1	1	0.8
11sal-e1-43b	-11	-1	2	0	3	1	2	1	0.7
11sal-e1-51b	-15	-1	12	2	8	2	0	0	-4.7
moy. :	8.2	0.7	9.2	1.5	4.5	1.5	1.3	0.8	1.6
(des val. abs.)	en %		en %		en %		en %		en %

tableau II-2 : Sallèles d'Aude expérimental. Résumé des tests d'évolution et test de bouclage d'anisotropie des échantillons suite aux essais de différentes atmosphères de chauffe. **échantillon**, référence de l'échantillon, 260-100, après avoir atteint une température maximale de 260°C, l'échantillon est de nouveau chauffé à 100°C, Ep, évolution partielle, Et, évolution rapportée à l'aimantation maximale, Bp, test de bouclage (voir texte).

Vide	ARN	p ARN	F
échantillon	(A/m)	en %	( $\mu$ T)
11sal-e1-25b	1.462	75	43.1
11sal-e1-27b	1.545	85	46.1
11sal-e1-33b	1.273	79	49.4
11sal-e1-35b	1.258	77	47.8
11sal-e1-38b	1.754	89	44.4
11sal-e1-44b	1.583	81	43.4
moy. :		81	45.7 $\pm$ 2.0
Air libre			
11sal-e1-21b	0.650	67	44.5
11sal-e1-22b	0.490	70	43.9
11sal-e1-28b	1.461	90	43.7
11sal-e1-29b	1.699	91	43.2
11sal-e1-40b	1.689	93	43.2
11sal-e1-41b	1.631	91	43.6
moy. :		84	43.7 $\pm$ 0.4
circulation d'azote			
11sal-e1-24b	1.574	87	43.3
11sal-e1-26b	1.660	82	40.8
11sal-e1-32b	1.097	72	43.4
11sal-e1-34b	0.610	58	42.2
11sal-e1-37b	1.674	88	41.3
11sal-e1-39b	1.538	83	40.4
moy. :		78	41.9 $\pm$ 1.0
Vide et azote			
11sal-e1-6b	1.974	70	40.0
11sal-e1-30b	1.645	77	42.6
11sal-e1-31b	1.312	86	46.7
11sal-e1-42b	1.342	90	37.7
11sal-e1-43b	1.448	89	38.8
11sal-e1-51b	1.433	85	43.4
moy. :		83	41.5 $\pm$ 2.7

tableau II-3 : Sallèles d'Aude expérimental.. Caractéristiques des déterminations d'intensité en fonction des atmosphères de chauffe. échantillon, référence de l'échantillon, ARN, valeur d'ARN de l'échantillon, p ARN, pourcentage d'ARN entrant en compte dans la détermination de l'intensité, F, Intensité estimée pour chaque échantillon après correction de l'anisotropie.

## **Estimation de l'intensité selon les différentes atmosphères.**

Quel est l'effet de l'atmosphère de chauffe sur l'estimation de l'intensité ? On note de façon générale que les tests de Thellier sont corrects. Nous sommes donc dans tous les cas dans de bonnes conditions d'estimation de l'intensité (tableau II-3).

La portion de spectre utilisée est quasiment la même dans chaque cas.

Les estimations moyennes, après corrections, sont relativement proches les unes des autres. Elles sont plus faibles que la valeur mesurée au site,  $45.3\mu\text{T}$  (Laubenheimer, communication personnelle). La moyenne estimée à partir d'échantillons chauffés en atmosphère sous vide est la plus proche de celle attendue. L'écart le plus important est constaté pour les échantillons chauffés en atmosphères d'azote. Le résultat obtenu à partir d'échantillons chauffés à l'air est un petit peu plus faible que celui des échantillons chauffés sous vide, mais l'erreur sur la moyenne y est la moins importante.

## **II-2-3 Remarque sur le comportement des échantillons durant les tests de balance de Curie**

### **A) Echantillons des Rairies**

Des balances de Curie ont été effectuées sur dix échantillons des Rairies (fig. II-4). Ces essais ont eu lieu soit en atmosphère libre, soit sous vide. Les comportements sont alors nettement fonction de l'atmosphère utilisée.

Lorsqu'ils sont chauffés sous vide les échantillons présentent systématiquement une courbe de retour qui passe au dessus de la courbe de chauffe, vers  $500^{\circ}\text{C}$ , indiquant la création de nouveaux porteurs magnétiques à aimantation à saturation plus élevée.

Lors des chauffés à l'air libre les échantillons ne montrent pas une telle évolution, et les courbes de refroidissement sont assimilables aux courbes de chauffe, aucune évolution n'étant nettement marquée.

### **B) Echantillons de Sallèles-expérimental n°1**

Les quelques balances de Curie effectuées à l'air sur les échantillons de Sallèles montrent surtout une perte en éléments volatiles, ce qui les rends difficilement interprétables. Toutefois parmi les échantillons testés, un ne présente pas ce comportement (fig. II-5). Les courbes de chauffe et refroidissement sont assez proches les unes des autres, et l'échantillon semble avoir une bonne stabilité des composants magnétiques durant la chauffe.

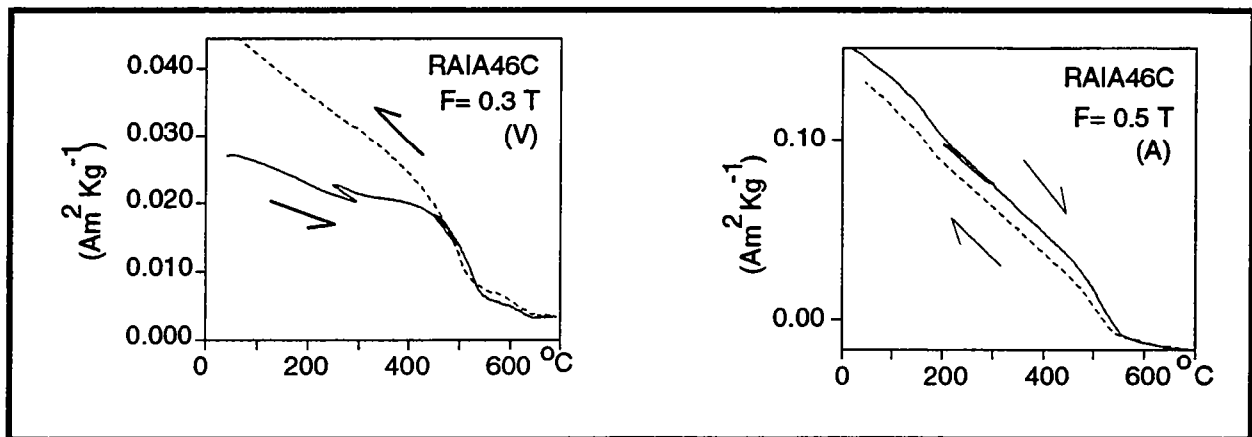


fig. II-4 : Différence de comportement des échantillons des Rairies en fonction de l'atmosphère de chauffe des balances de Curie (balance verticale). Ici, lors des deux tests, il s'agit de poudre provenant du même échantillon Rai-46C.

- à gauche : chauffe sous vide, dans un champ de 0.3T, l'échantillon évolue par la création de nouveaux porteurs magnétiques. L'aimantation induite finale est supérieure à la valeur initiale.
- à droite : chauffe à l'air, dans un champ plus élevé, de 0.5 T. Le test effectué entre 300 et 200°C ne montre pas d'évolution. La courbe de refroidissement total est faiblement décalée de la courbe de chauffe (ce qui pourrait s'expliquer par la faible perte de poids).

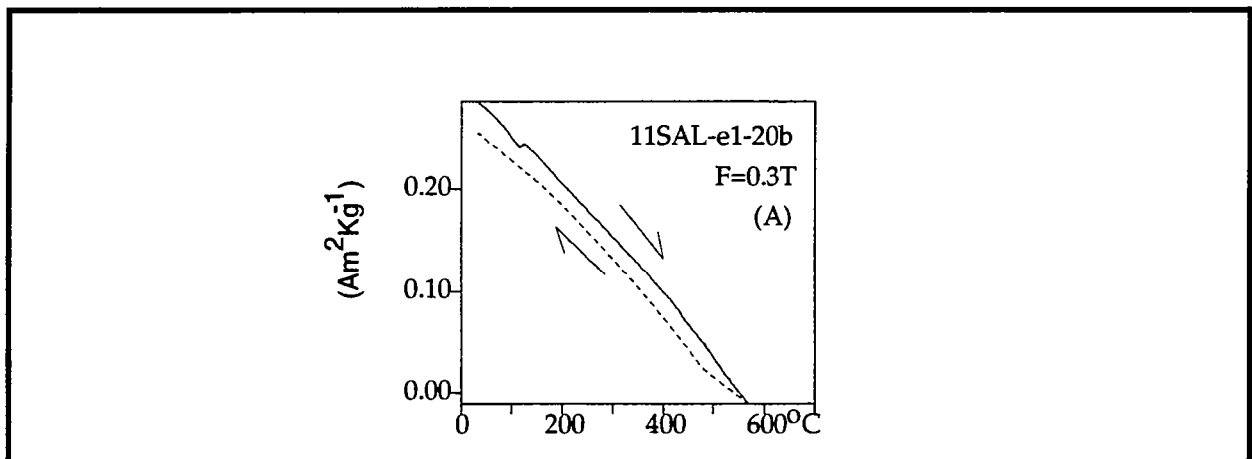


fig. II-5 : exemple de balance de Curie sur un des échantillons de Sallèles d'Aude expérimental n°1. Cette balance est réalisée dans un champs de 0.3 Tesla. Cet échantillon qui montre très peu de perte de poids liée aux éléments volatiles, reste stable lors de la chauffe pourtant réalisée à l'air.

## II-2-4 Remarque sur l'aspect extérieur des échantillons de Sallèles expérimental

Suite à l'exposition aux chauffes sous vide, les échantillons à l'origine de couleur marron-clair, se sont peu à peu recouverts d'une teinte grise, habituellement caractéristique des atmosphères réductrices. Il en est de même pour les échantillons chauffés en atmosphère d'azote après application du vide.

Le cas des échantillons chauffés sous circulation d'azote est intéressant car ils présentent un gradient dans les couleurs allant du gris sombre à proximité du passage d'azote au gris-marron clair vers le fond du tube, là où la circulation des gaz est certainement la plus réduite.

L'azote a donc un effet réducteur superficiel sur les échantillons. Superficiel car si un de ces échantillons est écaillé, l'intérieur montre sa couleur d'origine. Il semble donc que la réduction agisse juste à la surface. Ceci expliquerait la bonne tenue d'ensemble des échantillons lors des estimations d'intensité.

Les échantillons chauffés à l'air conservent quant à eux leur couleur de départ.

## II-2-5 Conclusion

Des quatre types d'atmosphères utilisées, air, vide, vide et azote, circulation d'azote, aucune ne se distingue des autres. Les tests, qu'ils soient de bouclage ou de Thellier, sont corrects d'autant plus s'ils sont exprimés par rapport à l'aimantation maximale de l'échantillon.

Toutefois, dans le cas des échantillons des Rairies, nous remarquons que les résultats des tests de bouclage à haute température, sont meilleurs pour des chauffes à l'air libre. Les balances de Curie réalisées dans cet atmosphère montrent le moins d'évolution elles aussi.

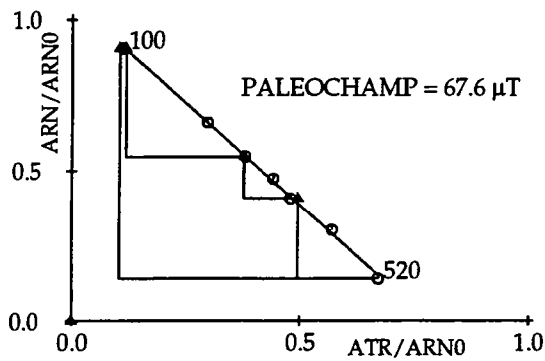
Par contre, dans le cadre des essais sur Sallèles d'Aude, les tests d'évolution sont légèrement meilleurs pour des atmosphères azotées. Mais ce gaz entraîne une variation superficielle de la couleur des échantillons. Cela signifie donc qu'une réaction existe, même si elle semble cantonnée à la surface de l'échantillon.

Les déterminations de l'intensité apparaissent plus proches de la réalité lorsqu'elles sont réalisées sous vide, ou à l'air, plutôt qu'en présence d'azote.

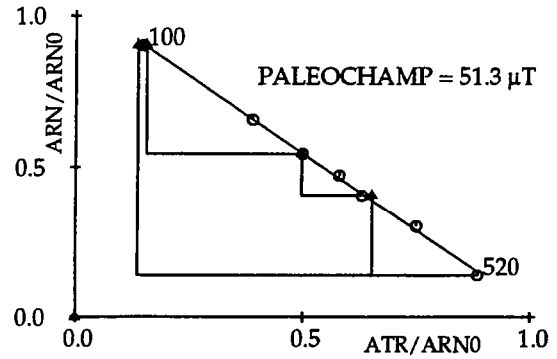
Nous pensons pouvoir relier ce résultat au mode de cuisson des échantillons. Les pièces d'où ils sont extraits proviennent de fours à tirage probablement à dominante oxydante. La couleur claire des échantillons semble en être le résultat le plus apparent.

Le matériel utilisé par la suite sera sélectionné parmi des lots du type briques, carreaux ou tuiles, ou bien carottés sur des fonds de fours. Il est possible que l'on soit alors confronté à des matériaux réduits, qu'il s'agisse de matériel déplacé, ou de structures en place. Il est évident que des essais, dans les conditions prescrites par Khodair et Coe (1975), ou bien en atmosphère azotée, pourront alors être de nouveaux effectués.

**31TAB3-55B**  
**CHAMP LABORATOIRE = 50.0  $\mu$ T**  
**anisotropie :  $K1/K3 = 1.35$**



a) sans correction d'anisotropie.



b) correction de l'anisotropie

fig. II-6 : estimation de la paléointensité de l'échantillon 31tab3-55B extrait d'une brique :

- a, sans correction d'anisotropie,
- b, après correction d'anisotropie d'ATR.

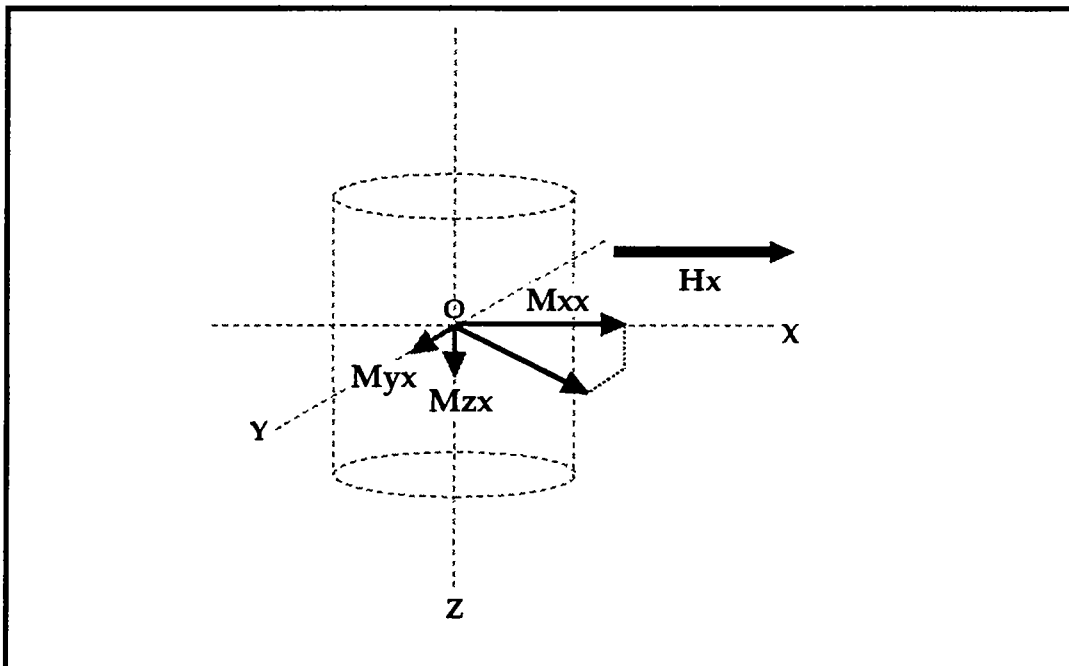


fig. II-7 : détermination des caractéristiques d'anisotropie d'ATR. Le champ d'induction dirigé selon x lors de l'acquisition d'ATR, crée non seulement une aimantation selon l'axe x ( $M_{xx}=K_{xx}.H_x$ ), mais aussi selon y ( $M_{yx}=K_{yx}.H_x$ ) et z ( $M_{zx}=K_{zx}.H_x$ ), du fait de l'anisotropie. La mesure de ces ATR, complétées par une acquisition d'aimantation avec un champ d'induction dirigé selon y, puis selon z, permet de calculer les termes du tenseur.



Finalement notre choix se portera sur l'atmosphère d'air libre :

- dans les deux cas testés, Les Rairies et, de façon moindre, Sallèles d'Aude, les tests d'évolution n'ont pas détecté de fortes évolutions,
- les estimations de l'archéointensité sont proches de la réalité,
- sa facilité d'utilisation ne pose pas de problème d'application.

## **II-3 Anisotropie d'aimantation**

L'anisotropie d'aimantation trouve son origine dans la forme, la susceptibilité, et l'orientation, des composants magnétiques des roches et des terres cuites (Hrouda 1982). Aux différents types d'aimantation correspondent les différents types d'anisotropie. Nous parlerons ainsi d'anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM, très utilisée pour les études de déformation des roches), d'anisotropie d'aimantation anhystérétique (ARA) et d'anisotropie d'aimantation rémanente isotherme (ARI), parfois utilisées en remplacement de l'ASM, et enfin pour ce qui nous intéresse plus particulièrement, d'anisotropie d'aimantation thermorémanente (ATR).

### **II-3-1 L'anisotropie d'Aimantation Thermorémanente**

Plusieurs chercheurs se sont intéressés aux problèmes d'anisotropie d'ATR dans les terres cuites (Rogers & al., 1979, Aitken & al., 1981, Veitch & al., 1984, Lanos, 1987, Yang & al., 1993a et b). Comme nous l'avons déjà dit, elle se manifeste par la déviation de l'aimantation par rapport à la direction du champ appliqué.

Lors des déterminations de paléointensité l'échantillon est réaimanté suivant un seul axe (z). Si l'anisotropie d'ATR n'est pas prise en compte une erreur importante peut être faite sur l'estimation de l'intensité (fig. II-6 a et b).

Deux solutions existent pour corriger cet effet afin de faire de la paléointensité, c'est à dire comparer l'ARN et l'ATR donnée au laboratoire comme si elles étaient acquises dans les mêmes conditions :

- Aitken préconise de réorienter l'échantillon par rapport au champ d'induction du laboratoire, de façon à ce que ce dernier permette l'acquisition d'une aimantation de même direction que l'ARN (Aitken, 1981),
- s'il n'est pas possible d'orienter les échantillons à sa guise par rapport au champ, la correction passe par la détermination du tenseur d'anisotropie. C'est cette situation qui est la notre.

## Notion de tenseur

Soit un échantillon de coordonnées Oxyz. Si le matériel se révèle anisotrope l'expression de l'aimantation M acquise dans un champ H peut être exprimée par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad f \text{ II-8}$$

ou encore

$$M_i = K_{ij} \cdot H_j \quad f \text{ II-9}$$

où  $i, j = x, y, z$ , et  $K_{ij}$  exprime la susceptibilité apparente dans la direction  $i$  pour un champ  $H_j$  agissant dans la direction  $j$ .

Dans ses travaux sur l'anisotropie d'aimantation dans les roches, Daly (1970) a montré que les termes non diagonaux de la matrice de susceptibilité peuvent être considérés comme symétriques si, et seulement si, la proportionnalité entre l'intensité du champ appliqué, H, et l'aimantation acquise, M, existe. A ce moment, il est possible d'écrire que  $K_{ij} = K_{ji}$ .

Lanos (1987) a vérifié cette propriété dans ses expériences d'acquisition d'ATR dans les terres cuites.

## Détermination du tenseur d'anisotropie

La détermination du tenseur d'anisotropie ne pose théoriquement pas de problème. Ces valeurs sont déterminées expérimentalement en appliquant selon les axes  $x, y, z$ , de l'échantillon un champ de laboratoire de valeur constante. Entre chaque application, l'aimantation est mesurée et permet de calculer les termes, un diagonal et deux symétriques, liés à la direction du champ (fig. II-7). Une fois la moyenne des termes symétriques réalisée,  $\frac{(K_{ij} + K_{ji})}{2}$ , le tenseur est diagonalisé, ce qui permet d'obtenir les valeurs propres ( $K_1$ , valeur maximale,  $K_2$ , valeur intermédiaire et  $K_3$ , valeur minimale) et les directions des vecteurs propres associés.

Les directions des vecteurs propres du tenseur d'anisotropie sont souvent assimilées aux directions des forces que l'on pense être celles ayant donné la forme de l'objet : compression, pour aplatir le paton d'argile, globalement dirigée dans la direction de l'épaisseur, étirement, pour allonger l'objet, orienté dans le plan de surface maximale. Cette assimilation trouve son origine dans les multiples expériences réalisées sur matériel déplacé, tuiles, briques ou carreaux. Sur ces échantillons, pour la majorité carottés dans l'épaisseur du plan de l'objet, il est en effet très fréquent d'observer qu'à

valeur constante de champ d'induction, l'ATR est d'intensité constante quelle que soit la direction dans laquelle elle est donnée, à partir du moment où elle est parallèle au plan d'aplatissement de l'échantillon. A l'inverse, l'aimantation acquise dans la direction perpendiculaire à ce plan, c'est à dire selon l'épaisseur de l'objet, est la plus faible qu'il puisse être possible d'obtenir. Ce comportement a permis à Rogers & al. (1979) de décrire ces échantillons comme comportant un "plan de facile aimantation" et, perpendiculairement un axe de "difficile aimantation".

Nous reviendrons par la suite, après avoir observé nos échantillons, sur la validité de la généralisation de ce modèle à tous les échantillons de matériel déplacé.

### **Avantages et inconvénients de la détermination du tenseur d'ATR**

Les avantages sont nombreux :

- grâce à l'emploi de la méthode Thellier-Thellier (encore un des avantages de cette méthode !), il est possible de le calculer à la température de notre choix, même si la procédure de détermination d'intensité est en cours. Nous évitons ainsi d'avoir à atteindre les hautes températures susceptibles de provoquer une évolution de la minéralogie magnétique,

- lorsqu'on utilise cette méthode, le travail est déjà partiellement effectué si on prend soin de choisir une étape de température identique à une de celles déjà utilisées pour la détermination de l'intensité : l'acquisition d'ATR selon l'axe z de l'échantillon est déjà connue par le calcul des valeurs ARN-ATR d'intensité à cette étape.

C'est souvent la température de la dernière étape d'estimation de l'intensité qui est choisie, car elle correspond au maximum d'ATR acquise par les échantillons. Nous pouvons effectuer un test de Thellier préalable afin de vérifier qu'il n'y a pas eu d'évolution du spectre de températures de blocage.

Les inconvénients ne sont pas négligeables :

- la détermination du tenseur d'ATR entraîne malgré tout de nouveau l'exposition répétée à de hautes températures (2 chauffes par axe, pour s'affranchir de l'ARN conservé, plus une chauffe de bouclage), avec un risque toujours présent d'évolution de la minéralogie magnétique,

- cette évolution, si elle existe, se répercute en rendant inutile la détermination des couples ARN-ATR d'intensité à des étapes de températures supérieures,

- enfin la répétition des chauffes augmente notablement la durée des manipulations.

### II-3-2 Essais de substitution de la détermination de l'anisotropie d'ATR par une autre méthode

Le but de ces essais est d'arriver à déterminer les particularités du tenseur d'anisotropie d'ATR (direction des vecteurs propres et rapports des valeurs propres), tout en évitant les inconvénients précédemment cités.

Nous pouvons formuler cette idée sous une autre forme : connaissant les caractéristiques des autres tenseurs d'anisotropie de l'échantillon, tenseurs d'ASM, tenseurs d'anisotropie d'ARA et d'ARI, sommes nous capables de déterminer celles du tenseur d'ATR ?

A cette fin nous devons nous assurer que les conditions suivantes sont vérifiées :

- concordance des directions des vecteurs propres,
- il existe un rapport constant de proportionnalité entre rapports d'anisotropie de l'aimantation étudiée et rapports d'anisotropie d'ATR (proportionnalité des valeurs propres).

Quelle que soit la méthode de substitution employée, le seuil de précision peut être défini, en première approximation, comme celui permettant d'obtenir des estimations d'intensité identiques à celles obtenues en utilisant l'anisotropie d'ATR.

#### Conditions expérimentales

Les mesures d'anisotropie de susceptibilité en champ faible sont effectuées grâce à un Digico. Un traitement informatique associé permet d'obtenir directement les caractéristiques du tenseur.

Les mesures d'anisotropie d'ARA sont effectuées en plaçant les échantillons dans une bobine alimentée par courant alternatif. Cette bobine est elle même placée dans le champ terrestre ( $F \approx 47 \mu\text{T}$ ) de façon à ce que l'axe de la bobine soit confondu avec la direction principale du champ. Le déroulement de la procédure est le suivant :

- désaimantation thermique de l'échantillon à  $700^\circ\text{C}$  avec refroidissement en champ nul,
- acquisition d'ARA selon l'axe  $x$ , avec aimantations successives, selon  $+x$  et selon  $-x$ , et par étapes croissantes de 40 à 99 mT,
- deuxième désaimantation thermique de l'échantillon,
- acquisition d'ARA selon l'axe  $y$ ,
- troisième désaimantation thermique de l'échantillon,
- acquisition d'ARA selon l'axe  $z$ .

La désaimantation est obligatoire sinon lors de la réaimantation selon un axe il reste, sur l'axe précédemment aimanté, un résidu d'aimantation qui fausse tous les résultats. La désaimantation thermique a été choisie par commodité : le montage d'acquisition d'ARA utilise la seule bobine qui, en temps normal, est employée à la désaimantation par champ alternatif. Evidemment ce passage obligé

par une chauffe comporte les mêmes inconvénients que la détermination de l'anisotropie d'ATR. Nous y reviendrons par la suite.

Les mesures d'anisotropie d'ARI ont été limitées à deux échantillons et à l'acquisition d'ARI dans un champ maximum de 80 mT. Cette valeur a été fixée afin de pouvoir effectuer des désaimantations par champ alternatif (limité par construction à 99mT).

La proportionnalité des valeurs propres est calculée en utilisant les formules présentées par Stephenson & al. dans leur article de 1986. Il s'agit en fait de calculer et comparer les valeurs propres des tenseurs diagonalisés ( $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$ ), après les avoir normalisé. Ces valeurs sont alors notées  $ps_i$  pour l'ASM,  $pr_i$  pour l'anisotropie d'ATR,  $pa_i$  pour l'ARA et  $pi_i$  pour l'ARI (formule II-8) :

$$ps_i = \frac{(K_i)_{ASM}}{\left( \frac{3}{\sum_{i=1}^3 K_i} \right)_{ASM}}, \quad pr_i = \frac{(K_i)_{ATR}}{\left( \frac{3}{\sum_{i=1}^3 K_i} \right)_{ATR}}, \quad pa_i = \frac{(K_i)_{ARA}}{\left( \frac{3}{\sum_{i=1}^3 K_i} \right)_{ARA}}, \quad \text{et } pi_i = \frac{(K_i)_{ARI}}{\left( \frac{3}{\sum_{i=1}^3 K_i} \right)_{ARI}}.$$

### II-3-2-1 Anisotropie d'ATR et ASM

Nous avons utilisé les 200 échantillons (extraits de matériel orienté et prélevé en place, et matériel déplacé) employés dans nos expériences de détermination de l'intensité. Ceux-ci présentent des tenseurs d'anisotropie d'ATR très variables (caractéristiques résumées en annexe).

Si l'on compare la disposition des directions des vecteurs propres des tenseurs d'AMS et ATR nous observons que les axes sont soit confondus (fig. n° II-8-a et d), soit confondus mais avec des inversions entre les axes maxima et les axes intermédiaires (fig. II-8-b), soit complètement décalés (fig. II-8-c). Il est clair que, lorsque les rapports d'anisotropie sont élevés, les écarts, entre directions de vecteurs propres de même ordre de classement, sont les plus faibles.

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés au comportement des échantillons provenant du site de Sallèles-d'Aude. Il s'agit d'une dizaine de lots de caractéristiques minéralogiques relativement homogènes. Nous comptons sur cette apparente homogénéité, pour ne pas introduire d'artefact lié à des différences minéralogiques, dans nos calculs de proportionnalité. Les résultats sont les suivants (tableau II-4):

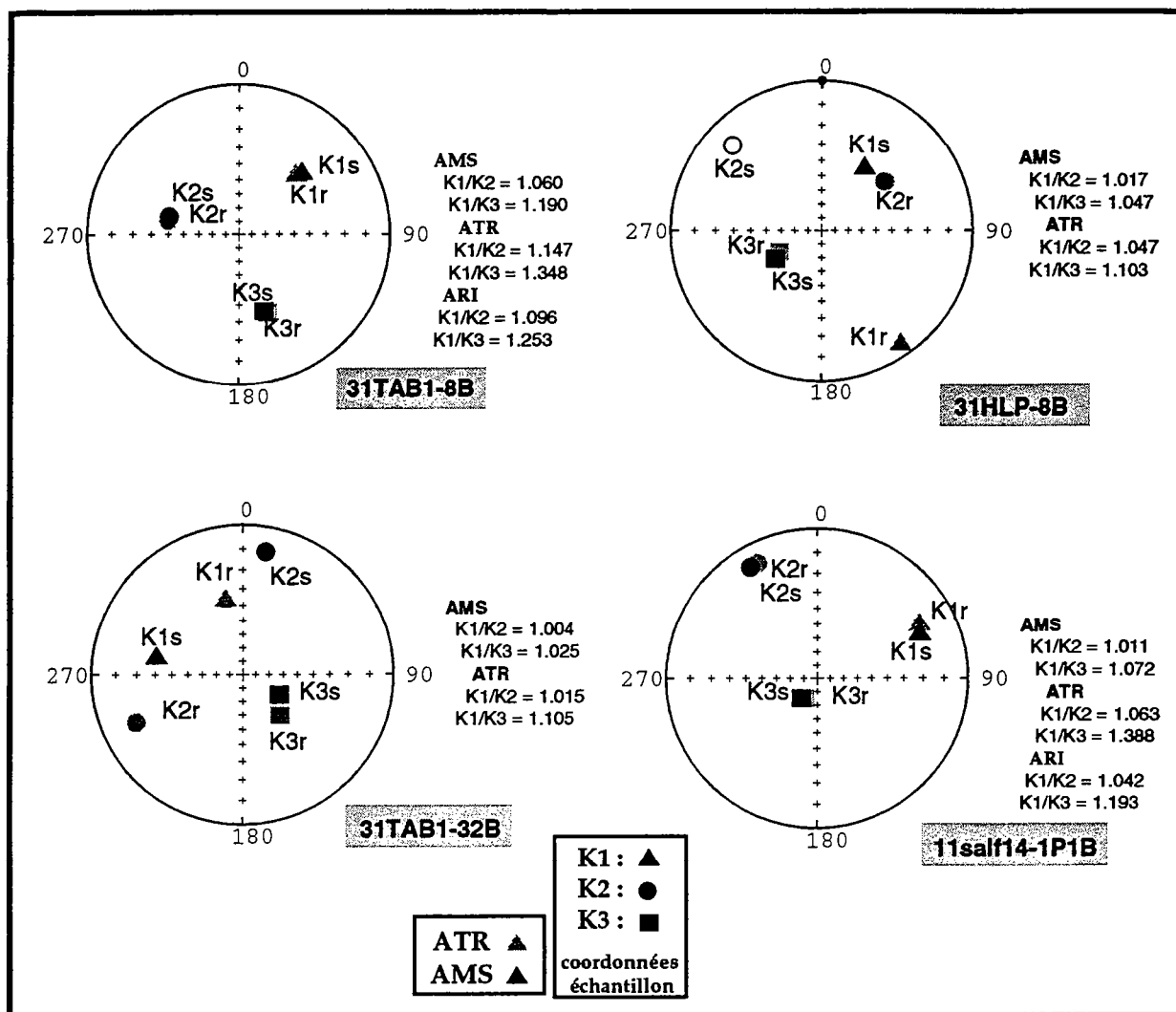


fig. II-8 : projections stéréographiques des vecteurs propres des tenseurs d'anisotropie d'ATR (symbole r), d'ARI (i) et ASM (s) de quelques échantillons utilisés pour la détermination de l'intensité (K1, vecteur propre maximal, K2, intermédiaire, K3, minimal).

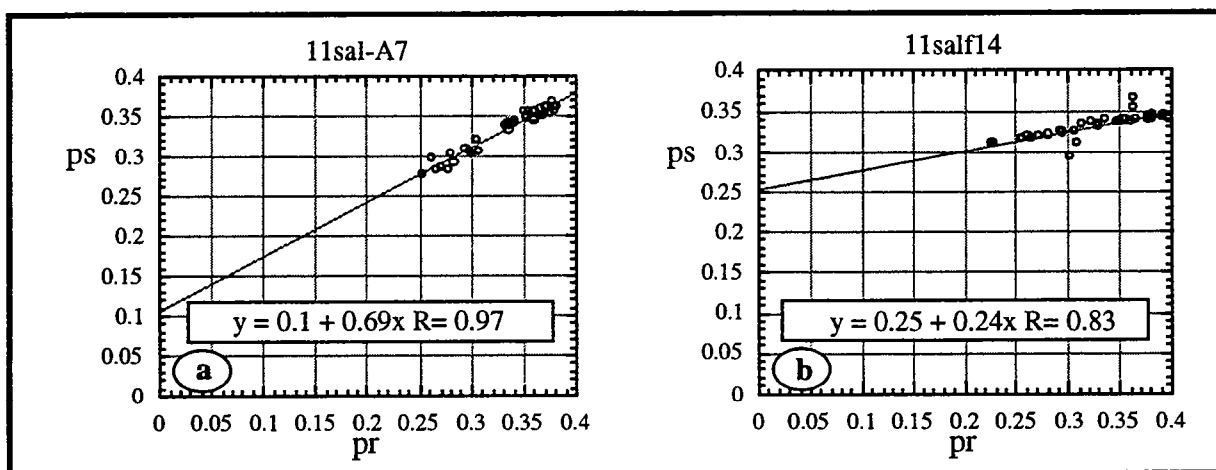


fig. II-9 : relations entre les diverses valeurs propres normalisées d'AMS et ATR. ps et pr sont les valeurs des susceptibilités principales normalisées des tenseurs diagonalisés (ps pour l'ASM et pr pour l'ATR, Stéphenson & al., 1982, voir texte).  
 - a et b, comportement général des lots 11sal-A7 et 11salf14 (on remarque le comportement particulier des échantillons 11salf14-4P1 et 11salf14-4P3 qui se dégagent de la tendance linéaire).

Lot	équation de la droite	coef. cor. lin.
11sal-A7	$ps = 0.10 + 0.69 \cdot pr$	0.97
11salf3	$ps = 0.18 + 0.47 \cdot pr$	0.84
11salf7	$ps = 0.26 + 0.21 \cdot pr$	0.66
11salf8	$ps = 0.13 + 0.62 \cdot pr$	0.95
11salf9	$ps = 0.15 + 0.54 \cdot pr$	0.93
11salf10	$ps = 0.22 + 0.34 \cdot pr$	0.73
11salf12	$ps = 0.15 + 0.55 \cdot pr$	0.90
11salf13	$ps = 0.23 + 0.32 \cdot pr$	0.79
11salf14	$ps = 0.25 + 0.24 \cdot pr$	0.83
11salf15	$ps = 0.17 + 0.49 \cdot pr$	0.95

tableau II-4 : lots provenant de Sallèles d'Aude . Equation de la droite exprimant la proportionnalité entre les valeurs propres normalisées des tenseurs diagonalisés d'ASM (ps) et ceux d'ATR (pr), pour tous les échantillons du lot. Lot référence du lot, équation de la droite, coef cor lin. coefficient de corrélation linéaire.

Des relations linéaires sont en effet trouvées, mais les pentes calculées varient du simple au triple selon les lots (fig. II-9-a et b). Les coefficients de corrélation linéaire varient de 0.66 à 0.97. Nous remarquerons que la variation de valeur de pente des lots à coefficient de corrélation élevé, les plus significatifs, est loin d'être négligeable de l'un à l'autre (11sal-A7 et 11salf15 par exemple).

#### Discussion des résultats : AMS/ATR

Ces expériences amènent plusieurs remarques :

- nous avons pu constater fréquemment une différence d'orientation des vecteurs propres des tenseurs d'anisotropie d'ATR et ASM. Les rapports de valeurs propres de tenseurs sont souvent trouvés très faibles en ASM, auquel cas calculer les directions des axes propres n'a plus de signification. La détermination des axes d'ASM ne nous paraît donc pas pouvoir servir pour la détermination systématique des directions d'anisotropie d'ATR,

- nous avons vu qu'une relation linéaire, entre ASM et anisotropie d'ATR, peut effectivement être calculée au sein d'un lot. Mais l'usage de cette relation est limité uniquement au lot : connaissant les caractéristiques des tenseurs d'anisotropie de ce lot nous sommes incapables de définir celles d'un autre. Même si ceux-ci proviennent d'un site d'approvisionnement identique (Sallèles-d'Aude). Pour déterminer ce rapport, il faut donc refaire l'expérience pour chaque nouveau lot étudié, c'est à dire déterminer pour chaque échantillon un rapport entre AMS et ATR. Ce que nous cherchons à éviter...

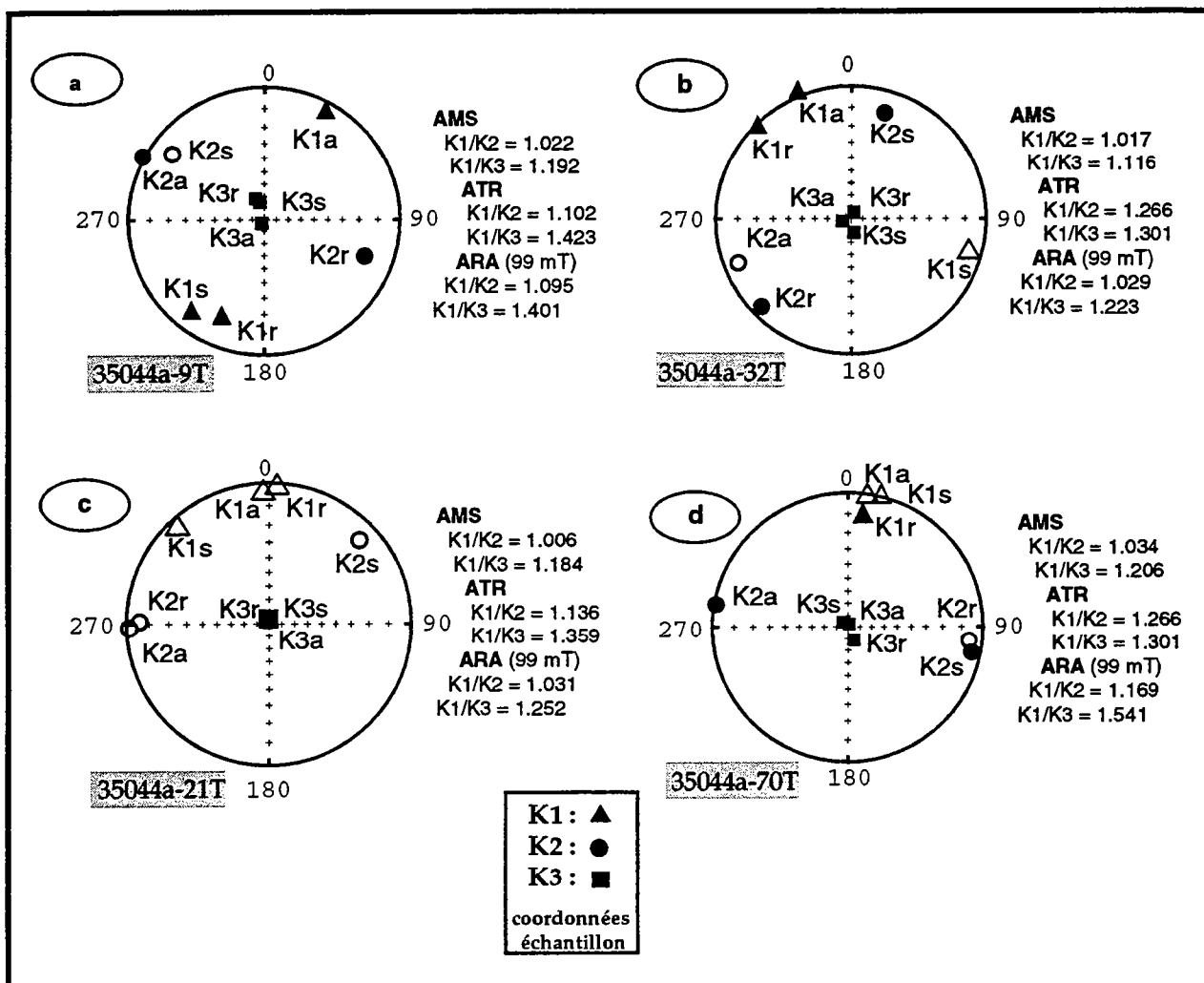


fig. II-10 : projections stéréographiques de divers vecteurs propres (K1, vecteur propre maximal, K2, intermédiaire, K3, minimal) liés aux anisotropie d'ATR (symbole r), ARA(a) et AMS (s) de quelques échantillons.



- la troisième remarque concerne la disposition des axes des tenseurs par rapport aux axes de l'échantillon. Si, dans la majorité des cas, le modèle à plan de facile aimantation selon Oxy est retrouvé, la généralisation à tous les échantillons serait fautive. Certains échantillons du lot 31TAB1 par exemple (fig. II-8-a et c), prélevés sur du matériel déplacé, et pourtant orientés selon les caractéristiques de symétrie des briques, montrent une disposition des axes des vecteurs propres totalement décalée des axes de symétrie du parallélépipède. L'assimilation des axes d'anisotropie aux axes de symétrie de l'échantillon 31TAB1-8B amènerait à une différence d'estimation de l'intensité de presque 10% (47.15  $\mu$ T en considérant l'anisotropie liée aux axes de l'échantillon et 52.8  $\mu$ T en tenant compte de la disposition du tenseur). L'effet sur la direction serait plus faible, 3° sur la déviation et 1° sur l'inclinaison.

### II-3-2-2 Anisotropie d'ATR et d'ARA

Nous avons utilisé, dans ces essais, une série d'échantillons extraits d'un lot déjà étudié par P. Lanos (1987).

Les axes minima sont confondus et lorsque la foliation magnétique est bien marquée les axes maxima et intermédiaires le sont aussi (fig. II-10).

Les valeurs propres d'anisotropie d'ARA, normalisées (pa), ont été calculées pour chacune des valeurs de champ alternatif. Pour les échantillons qui ont des rapports de valeurs propres élevés, le rapport de proportionnalité entre pa et pr est stable et ce quelle que soit la valeur du champ alternatif (tableau II-5). Mais même lorsque le coefficient de corrélation linéaire est élevé, les équations reliant les valeurs propres normalisées d'anisotropie sont différentes d'un échantillon à l'autre.

échantillon	Haf (mT)	équation de la droite	coef. cor. lin.
35044a-9T	40	$pa = 0.01 + 0.98 \cdot pr$	0.99
	60	$pa = 0.01 + 0.97 \cdot pr$	0.99
	80	$pa = 0.01 + 0.94 \cdot pr$	0.99
	99	$pa = 0.01 + 0.96 \cdot pr$	0.99
35044a-21T	99	$pa = -0.11 + 1.34 \cdot pr$	0.97
35044a-70T	99	$pa = -0.07 + 1.21 \cdot pr$	0.86

tableau II-5 : lot 35044. proportionnalité entre les valeurs propres normalisées des tenseurs diagonalisés d'ARA (pa) et ceux d'ATR (pr). échantillon, référence de l'échantillon, Haf (mT), valeur du champ alternatif appliqué lors de l'acquisition de l'ARA, équation de la droite, coef cor lin. coefficient de corrélation linéaire.

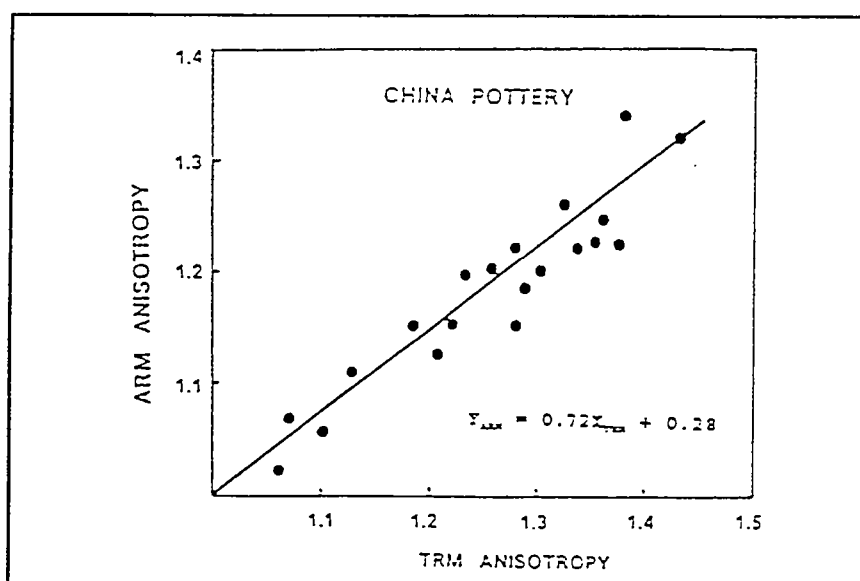


fig. II-11 : rapport entre anisotropie d'ARA et anisotropie d'ATR, présenté par Yang & al., 1993b.

Notre conclusion est donc identique à celle énoncée pour les possibilités de substitution de l'anisotropie d'ATR par l'anisotropie d'ASM : la connaissance acquise pour un échantillon ne peut pas servir pour un autre.

Le mode opératoire avec les désaimantations thermiques remettait déjà cette méthode en question, car pour le même nombre d'expositions aux chauffes il est possible de déterminer un tenseur d'anisotropie d'ATR (en travaillant à 680°C, avec une seule aimantation totale par axe).

Dans une récente publication d'étude de céramiques chinoises, Yang & al. (1993b) ont fait part de l'utilisation de l'anisotropie d'ARA en remplacement de l'anisotropie d'ATR. Une première investigation d'ASM a fait apparaître dans leurs échantillons une disposition "classique" du tenseur avec les axes maximal et intermédiaire disposés dans le plan perpendiculaire à l'axe de symétrie de la carotte. Des tests de détermination de tenseurs d'ARA (on ne connaît pas hélas la procédure suivie ni les valeurs de champ appliquées) ont confirmé cette disposition. L'analyse et la comparaison d'une vingtaine d'échantillons ont alors permis d'établir une relation linéaire entre anisotropie d'ATR et anisotropie d'ARA. Cette relation s'exprime par l'existence d'un rapport variant entre 0.88 et 1.00 entre les valeurs de  $\frac{K1}{K3}$  de l'ATR, et de  $\frac{K1}{K3}$  de l'ARA (fig. II-11). C'est apparemment le rapport moyen calculé,  $0.94 \pm 0.03$ , qui est par la suite utilisé comme facteur de correction entre anisotropie d'ARA et anisotropie d'ATR.

Dans l'optique d'obtenir les résultats les plus précis possibles, la variation entre 0.88 et 1.00 du rapport de proportionnalité nous apparaît trop importante pour que cette technique soit conservée.

### II-3-2-3 Anisotropie d'ARI et anisotropie d'ATR

Deux échantillons seulement ont fait l'objet d'étude des caractéristiques d'anisotropie d'ARI : un est extrait d'une brique (31TAB1-8B), l'autre provient de matériel orienté et prélevé en place (11salf14-1P1B)

Le problème principal de cette expérience est lié à la propriété de non-proportionnalité de l'ARI à l'intensité du champ appliqué. L'anisotropie ne doit donc normalement pas s'exprimer sous la forme d'un tenseur. Dans leurs travaux sur l'anisotropie d'ARI et ASM, Daly et Zinsser (1973) résolvent ce problème en réalisant leurs expériences en restant dans la zone des champs faibles, zone où la loi de Rayleigh est applicable (ARI proportionnelle au carré du champ). La valeur maximale atteinte était de 30mT.

Stephenson & al. (1986) ont réalisé quelques essais en appliquant des champs de 5mT à leurs échantillons de roches, et ont obtenu des directions des vecteurs propres confondues pour les tenseurs d'anisotropie d'ARI, d'ATR et d'ASM. Le même processus a été répété pour des échantillons synthétiques dont l'ARI, faible, a nécessité l'emploi d'un champ de 60mT.

Sur la base de ce résultat, Stephenson & al. ont proposé l'utilisation de l'anisotropie d'ARI pour la détermination des caractéristiques d'ATR et la correction des directions d'ATR en paléomagnétisme, lorsque la susceptibilité en champ faible n'est pas assez élevée pour être mesurée.

Les essais menés sur nos 2 échantillons montrent eux aussi une bonne concordance des axes d'anisotropie d'ATR et des axes d'anisotropie d'ARI acquis dans un champ de 80 mT (fig. II-8-a et d).

Les deux présentent des valeurs de foliation et linéation d'anisotropie d'ATR très proches. Les rapports de valeurs propres d'anisotropie d'ARI sont eux aussi proches, mais différents des rapports d'anisotropie d'ATR.

échantillon	équation de la droite	coef cor lin.
11saf14-1P1B	$pi = 0.15 + 0.54 . pr$	1.00
31tab1-8B	$pi = 0.04 + 1.08 . pr$	0.89

tableau II-6 : Test d'anisotropie d'ARI. proportionnalité entre valeurs propres normalisées des tenseurs diagonalisés d'ARI, (pi), et ceux d'ATR, (pr). échantillon, référence de l'échantillon, équation de la droite, coef cor lin. coefficient de corrélation linéaire.

Les rapports de proportionnalité, entre valeurs propres normalisées des tenseurs d'ARI (pi) et des tenseurs d'ATR (pr), sont différents d'un échantillon à l'autre, et celui de 11saf14-1P1B est largement différent de 1 (tableau II-6). Nous pouvions nous attendre à un tel résultat puisque ces échantillons sont d'origines totalement différentes. Cet essai confirme le fait que les relations de proportionnalité doivent systématiquement être recalculées à chaque étude d'un lot nouveau.

#### II-3-2-4 Conclusion

Ces techniques de substitution permettent parfois de retrouver les directions des vecteurs propres d'anisotropie d'ATR, mais ces cas se limitent aux échantillons dont les rapports d'anisotropie sont élevés. Dans ce contexte l'AMS est particulièrement limitée.

Nous pouvons aussi parfois calculer un rapport de proportionnalité entre les rapports d'anisotropie du type d'aimantation étudiée et l'ATR. Certains résultats obtenus avec des échantillons de Sallèles d'Audes pourraient être applicables au sein d'un lot. Mais toute étude d'un lot nouveau nécessite la répétition de ces calculs.

La substitution de la détermination de l'anisotropie d'ATR par un autre procédé, qu'il utilise la susceptibilité, l'ARA ou l'ARI, nous apparaît donc d'une précision insuffisante ou d'un emploi malcommode.

### **II-3-3 Fiabilité de la détermination de l'anisotropie d'ATR sur des gammes intermédiaires de température**

Aucune méthode testée précédemment n'ayant donné entière satisfaction, la résolution de notre problème passe obligatoirement par la détermination du tenseur d'anisotropie d'ATR. Le problème principal à régler est de réduire le risque d'évolution de l'aimantation au cours des chauffés successives. On va pour cela éviter les hautes températures et effectuer ce calcul sur une gamme de températures moins élevées.

Aitken & al., 1981, ayant rapporté l'existence d'échantillons dont l'anisotropie varie en fonction de la température à laquelle elle est calculée, nous devons vérifier que les valeurs propres ainsi que les vecteurs propres ne varient pas en fonction de la température.

**Etude d'un lot d'échantillons de Sallèles-d'Aude : détermination des tenseurs d'anisotropie aux températures de 350°C et 680°C**

Dix échantillons du lot 11salf14, dont les tenseurs d'anisotropie d'ATR ont été précédemment déterminés pour une température maximale de 350°C, a été sélectionnée pour le calcul du tenseur d'ATR à 680°C. Nous avons alors utilisé la procédure à aimantation unique selon chaque axe (la désaimantation étant totale à 680°C).

Nous pouvons qualifier ces échantillons de minéralogiquement stables même dans les hautes températures : les tests d'évolution partielle à 350°C, après chauffe à 500°C, montrent une évolution inférieure à 3%, excepté pour les échantillons 11salf14-4P1 (+5%) et 11salf14-4P3 (-7%), et l'évolution des capacités d'acquisition atteint au maximum 2.5% au bouclage à 680°C.

#### **Disposition des axes des vecteurs propres**

La concordance de l'orientation des axes n'est pas toujours parfaite, notamment lorsque les rapports  $K1/K2$  sont proches de 1.

Le rapport entre les valeurs propres est excellent et la pente de la droite moyenne passant par les points correspondants aux couples de valeurs propres à 350 et 680°C (maxima, intermédiaire et minima de chaque échantillon) a une valeur égale à 0.96 donc réellement très proche de 1 (fig. II-12).

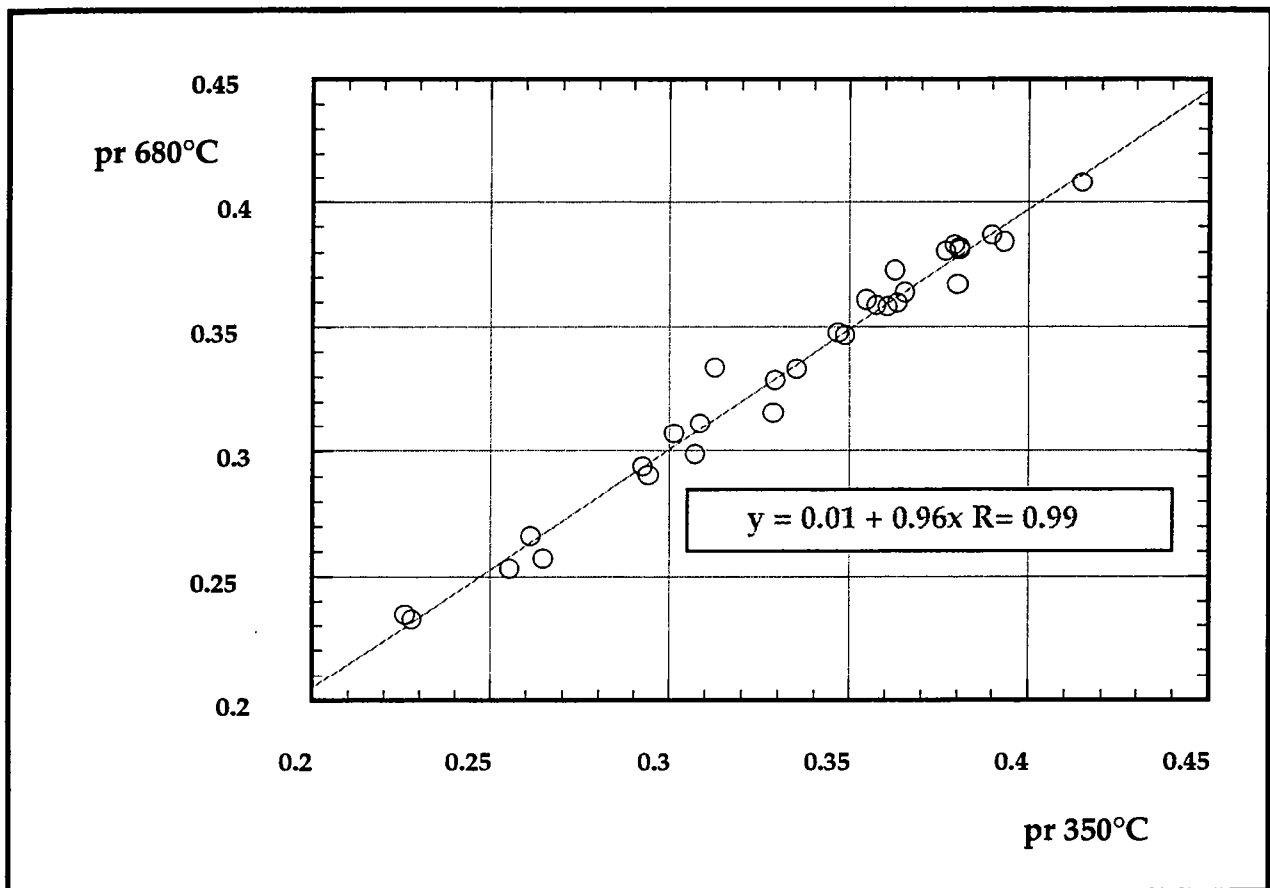


fig. II-12 : relation entre les valeurs propres normalisées des tenseurs d'anisotropie d'ATR calculés à 350°C ou 680°C.

## Evolution de l'estimation de l'intensité

Afin de finir d'étudier l'influence de la gamme de température dans le calcul des tenseurs d'anisotropie, les valeurs d'intensité ont été réestimées en utilisant les tenseurs obtenus à 680°C.

Les résultats sont présentés dans le tableau II-7

La troisième colonne de ce tableau présente l'évolution de la valeur du champ entre le premier et le deuxième calcul. Celle-ci est très faible, inférieure à 1.3% en moyenne.

On peut donc présenter les deux moyennes d'intensités, estimées à partir des 10 échantillons, comme similaires, et ceci quelle que soit la gamme de température utilisée pour calculer le tenseur, à partir de 350°C, ou à partir de 680°C. Ces résultats nous permettent donc de considérer cette procédure comme correcte et utilisable.

Il est intéressant de noter qu'à 350°C, seul un pourcentage de 65% de l'ARN est concerné (55 et 57% pour 11salf14-3A et 11salf14-3A'). Ces valeurs ne sont pas spécialement élevées et suffisent pourtant pour obtenir un bon résultat. L'anisotropie d'ATR nous apparaît donc comme relativement indépendante du spectre des températures de blocage des grains magnétiques composant nos échantillons. Nous allons revenir sur cette notion dans le chapitre suivant.

échantillon	K1/K3 350°C	F <sub>350°C</sub>	K1/K3 680°C	F <sub>680°C</sub>	évolution
11salf14-1P2	1.23	68.19	1.22	67.49	-1.0%
11salf14-2P1	1.28	66.16	1.31	65.92	-0.4%
11salf14-2P2	1.24	66.55	1.23	63.98	-4.0%
11salf14-3P1A	1.74	66.11	1.64	66.17	+0.0%
11salf14-3P1B	1.82	66.79	1.75	66.91	+0.2%
11salf14-4P1	1.21	70.42	1.17	70.98	+0.1%
11salf14-4P3	1.17	67.78	1.20	70.09	+3.5%
11salf14-9P2	1.49	62.22	1.45	61.67	-1.0%
11salf14-17P1C	1.48	65.92	1.51	64.56	-2.1%
11salf14-17P2	1.44	64.02	1.49	63.78	-0.4%
moyenne :		66.42		66.16	1.3 en val. abs.

tableau II-7 : lot 11salf14 de Sallèles d'Aude. Valeurs estimées d'archéointensité, après correction de tenseur d'anisotropie d'ATR calculés à la température de 350°C et 680°C. échantillon, référence de l'échantillon, K1/K3, degré d'anisotropie, F<sub>350°C</sub>, intensité estimée avec un tenseur d'anisotropie calculé à la température de 350°C, F<sub>680°C</sub>, intensité estimée avec un tenseur d'anisotropie calculé à la température de 680°C, évolution, différence entre les deux estimations d'intensité (F<sub>680°C</sub> - F<sub>350°C</sub>/F<sub>350°C</sub>).

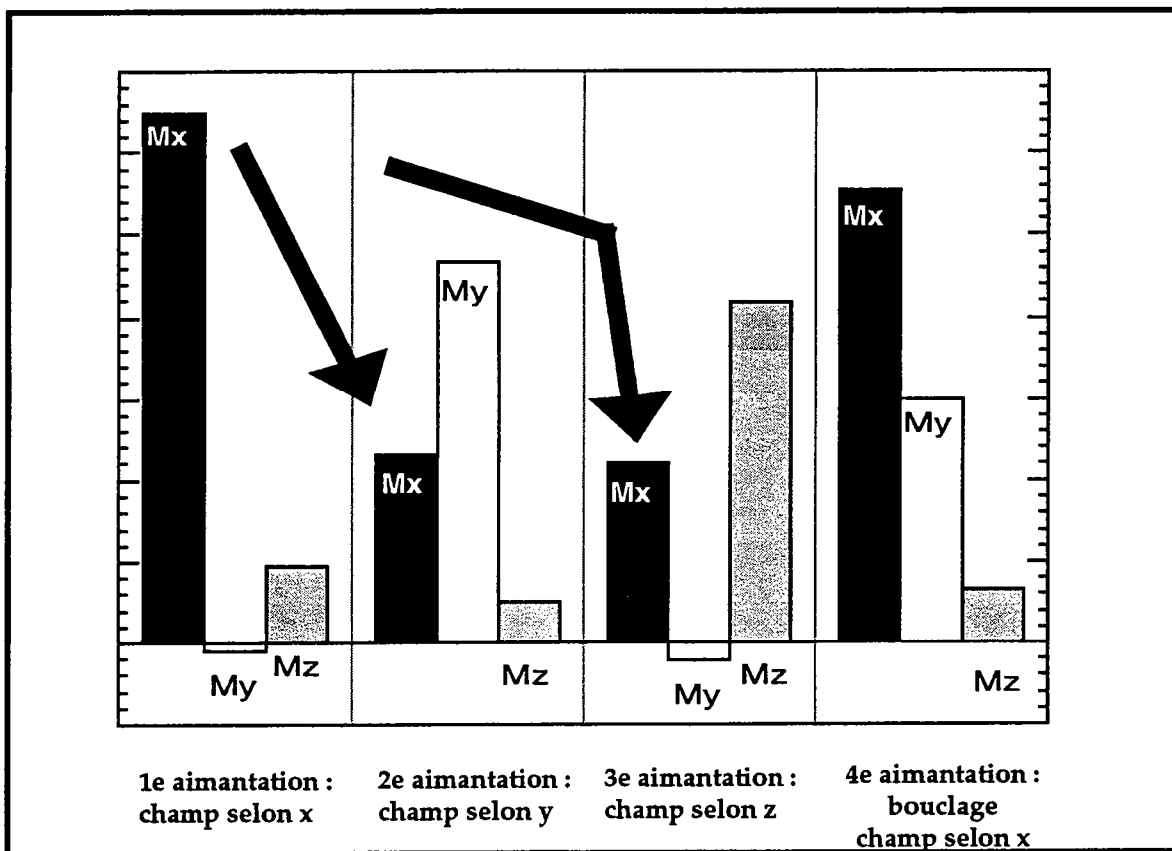


fig. II-13 : anisotropie d'ATR, étape à 400°C, échantillon d'adobe. Persistance, lors des réaimantations selon les axes y (colonne blanche) et z (colonne grisée), d'une aimantation acquise selon x (colonnes noires marquées par les flèches noires), par des minéraux magnétiques néoformés lors de la première chauffe à 400°C. Ces minéraux ont pour caractéristique des températures de blocage supérieures à 400°C, ce qui explique la résistance de leur aimantation à la désaimantation thermique lors de la chauffe.



## II-3-4 Conclusion

Dans la perspective de réduire le nombre de chauffages auxquelles sont soumis les échantillons, nous avons essayé de trouver une méthode de substitution qui permette de calculer de façon indirecte les caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'ATR. Les tests de comparaison d'ASM, d'anisotropie d'ARA et d'ARI, nous ont permis de confirmer, dans beaucoup de cas, l'individualité des comportements de chaque échantillon. Il nous semble ainsi inutile d'essayer d'établir un lien entre une de ces caractéristiques d'anisotropie et celle d'ATR. Ce lien serait à recalculer à chaque nouvel échantillon, ce que nous cherchons justement à éviter. L'utilisation en routine d'une de ces méthodes de substitution amènerait à une imprécision incompatible avec le souhait d'obtenir des déterminations précises des caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'ATR. Aucune de ces méthodes n'est donc retenue.

L'utilisation de chauffages répétées étant un passage obligé, nous avons étudié les possibilités d'utiliser des gammes intermédiaires de températures afin de déterminer le tenseur d'anisotropie d'ATR. Ceci dans le but d'éviter les risques d'évolution liés à l'utilisation de fortes températures. Les essais réalisés sur un des lots employés pour la détermination de l'archéointensité, montrent que cette méthode est fiable et donne de bons résultats. Cette dernière est donc retenue comme solution à notre problème.

## II-3-5 A propos de la détection d'évolutions de la minéralogie magnétique durant la détermination de l'anisotropie d'ATR.

### Exemple d'évolution

Des essais de détermination d'anisotropie d'ATR, réalisés sur une série de six échantillons d'adobe, donc sans aimantation préalable ont mis en évidence l'insuffisance des tests de bouclage à détecter certains types d'évolution.

Ces échantillons ont été successivement chauffés à l'air, à 200, 400 et 600°C, avec, à chaque étape, la détermination du tenseur d'anisotropie d'ATR. L'évolution calculée au bouclage n'est pas apparue élevée, même si les valeurs ont atteint 15% sur certains échantillons. Le cas précis d'un de ceux-ci est particulièrement intéressant car nous n'avons constaté à 400°C qu'une faible évolution, de -4% seulement. Les rapports d'anisotropie, calculés à cette température, sont élevés :  $K1/K2 = 1.65$  et  $K1/K3 = 1.85$ .

Considérés sur le seul critère d'une faible évolution au bouclage ces rapports seraient acceptés. En fait, comme le montre la figure II-13, cet échantillon acquiert à 400°C une aimantation chimique. Résultat : on mesure, lors de la réaimantation selon y et z, une forte aimantation selon x qui

pourrait être attribuée à l'effet de l'anisotropie. Lors du bouclage, la réaimantation selon l'axe x est trouvée quasi égale à celle mesurée la première fois, et aucune évolution particulière n'est détectée.

On le voit donc, dans ce contexte particulier, le critère du test de bouclage est insuffisant pour valider un résultat de détermination d'anisotropie. Par contre il reste suffisant comme critère de rejet.

Nous avons par la suite simulé différents types d'évolutions, sur échantillons avec ou sans aimantation préalable (le pire envisagé étant un échantillon à évolution systématique à chaque chauffe et acquisition d'aimantation par des minéraux néoformés selon chaque axe, du fait de l'anisotropie). Nous pouvons résumer ces problèmes à deux situations :

- si l'évolution est provoquée lors de la première chauffe, le calcul de bouclage "classique", aimantations acquises toujours dans la même direction, est impuissant à signaler ce changement. Celle-ci peut néanmoins être détectée, soit en inversant la direction du champ d'aimantation au bouclage et en comparant les termes symétriques, dans le tenseur d'ATR pour les échantillons sans ARN, soit en comparant les valeurs d'ARN, calculées à chaque double chauffe, pour les échantillons porteurs d'ARN. Dans ce dernier cas, la matrice d'ATR reste correcte (!),

- si l'évolution a lieu à chaque chauffe, alors il est possible de la détecter au calcul du test de bouclage. De toute façon, elle signifie la perte de l'égalité des termes symétriques dans le tenseur d'anisotropie d'ATR, pour les échantillons avec ou sans ARN. De plus pour les premiers, les valeurs d'ARN évoluent à chaque nouveau calcul.

Nous pouvons donc avec un minimum de vigilance surveiller le comportement de nos échantillons lors des déterminations d'anisotropie d'ATR.

Nous rappellerons d'ailleurs que lors de nos déterminations "en routine", sur des échantillons porteurs d'ARN donc, le calcul du tenseur d'ATR est effectué en deux temps. La première étape consiste au calcul des ARN et ATR portées par l'échantillon à la température cible, afin d'établir le diagramme d'Araï. Bien souvent un test de Thellier est intercalé à la suite, permettant de vérifier l'intégralité du spectre d'ATR sur une gamme de température intermédiaire, avant de poursuivre, par la deuxième étape, la détermination du tenseur par des acquisitions d'aimantations selon les autres axes de l'échantillon.

En fait, le cas le plus fréquemment rencontré suite à nos déterminations d'intensité, n'a pas été lié à un problème d'évolution, mais à un problème de position de l'échantillon lors des réaimantations selon x ou selon y :

- les différences les plus importantes constatées sur nos mesures, proviennent des termes symétriques  $K_{xy}$  et  $K_{yx}$ .

Le porte échantillon se présente sous la forme d'un rail sur lequel il est facile de coucher et caler l'échantillon cylindrique. L'acquisition de l'aimantation se fait alors selon l'axe z. Il est par contre

moins aisé de positionner et fixer l'échantillon tel qu'il n'y ait pas de décalage entre l'axe de symétrie du rail (qui est aussi la direction du champ d'induction) et l'axe de réaimantation choisie (axe x ou y). L'échantillon repose alors sur sa base circulaire plane, et peut être placé dans n'importe quelle direction.

Malgré toutes nos précautions, emploi de support de rail, avec les lignes directrices matérialisées pour positionner les échantillons parallèles, ou perpendiculaires, à l'axe de la bobine, emploi de colle (silicate de sodium) pour éviter toute rotation intempestive, il est arrivé qu'un léger décalage se produise.

Il est facile de calculer qu'un écart de trois degrés seulement dans l'alignement selon x peut engendrer selon y une aimantation de l'ordre de 5% de celle acquise selon x.

Cette valeur de 5% nous semble être un seuil réaliste à la précision optimale de nos mesures. Les écarts, constatés dans les termes symétriques, de valeur inférieure à 5% n'ont pas été pris en compte.

## **II-4 Etude des caractéristiques d'anisotropie d'ATR dans les terres Cuites**

L'origine de l'anisotropie d'ATR dans les terres cuites reste une question non résolue, même si les axes d'anisotropie sont souvent confondus avec les axes de symétrie des objets de type matériel déplacé, et font penser à une forte influence de la phase de fabrication.

Nous nous sommes intéressés à cette question. La détermination de l'intensité, effectuée pour onze sites différents en âge et origine géographique (21 lots au total), nous offre un vaste éventail de caractéristiques d'anisotropie d'ATR. Il est peut-être possible de mettre en évidence des relations entre ces caractéristiques et les propriétés magnétiques des différents échantillons.

### **II-4-1 Approche expérimentale**

L'idéal serait de mener cette analyse selon les critères suivants :

- relation anisotropie d'ATR - minéralogie,
- relation anisotropie d'ATR - forme des grains,

L'utilisation d'échantillons artificiels permet de contrôler certains de ces critères. Ici nous utilisons nos échantillons naturels, aussi les informations à notre disposition sont-elles limitées (susceptibilité en champ faible, températures de blocage, champs coercitifs, températures de désaimantation moyenne), et ne permettent pas de séparer la contribution de chaque facteur. Nous ne connaissons ni la forme des grains, ni leur tailles, ni leur concentration et disposition.

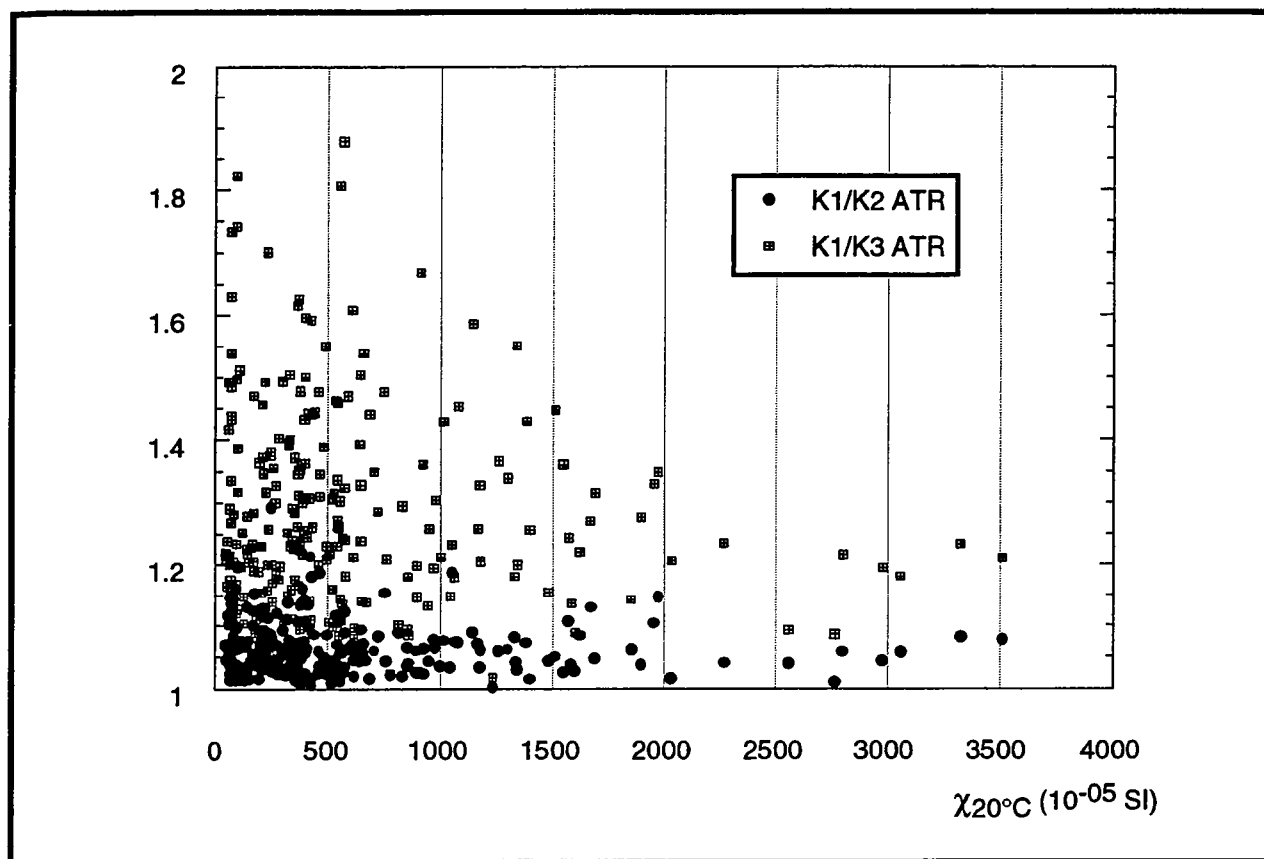


fig. II-14 : variation des rapports de valeurs propres d'anisotropie d'ATR en fonction de la susceptibilité en champ faible de chaque échantillon.

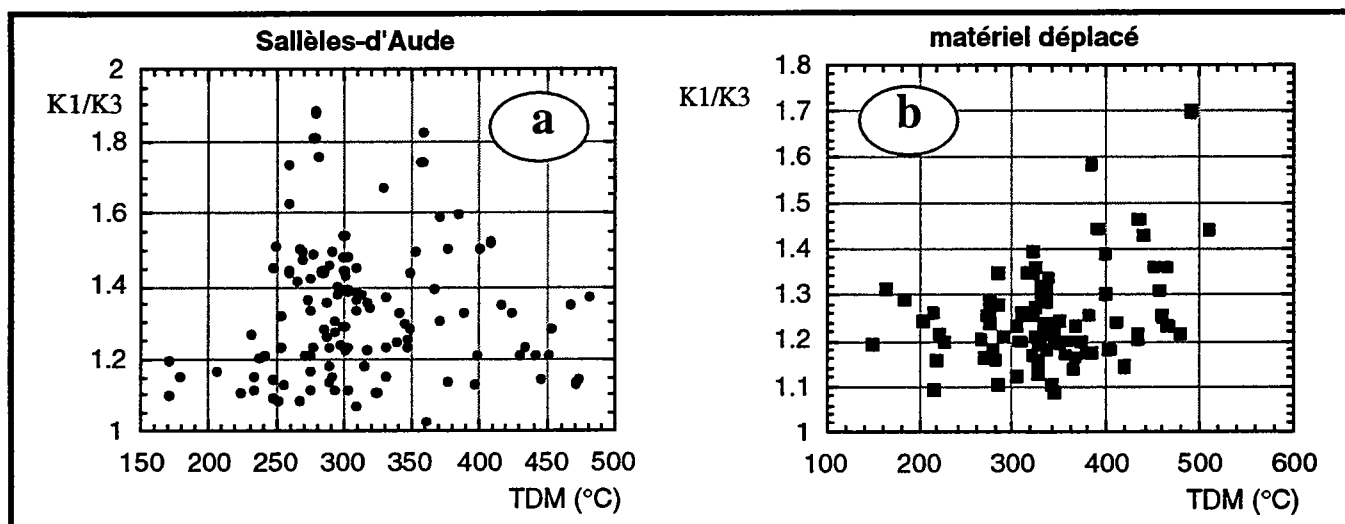


fig. II-15 : relation entre les TDMs, déterminées à partir des désaimantations thermiques des expériences de Thellier, et les rapports  $K1/K3$  des valeurs propres d'anisotropie d'ATR des mêmes échantillons.

- a) échantillons provenant des lots prélevés en place à Sallèles-d'Aude,
- b) ensemble des échantillons provenant de lots prélevés sur du matériel déplacé.

### **Relation anisotropie - susceptibilité en champ faible**

Nous observons plutôt de fortes valeurs des degrés d'anisotropie vers les faibles valeurs de susceptibilité (fig. II-14). Mais comme les échantillons de forte susceptibilité sont peu nombreux nous ne pouvons pas savoir s'il s'agit seulement d'un artefact lié à l'échantillonnage.

### **Relation anisotropie - TDM**

La valeur des Températures de Désaimantation Moyenne (TDM, température pour laquelle 50% de l'aimantation est désaimantée) des ARN, reflète la distribution des températures de blocage des grains, lesquelles sont fonction de la distribution des volumes de grains et de leur minéralogie magnétique (cf. chap. II-5).

Nous ne voyons pas de relation nette entre ces deux paramètres que ce soit dans le cas du matériel prélevé en place (fig. II-15-a), ou des lots de matériel déplacé (fig. II-15-b).

### **Relation anisotropie - minéralogie**

A sept échantillons provenant de lots de matériel déplacé nous avons donné une ARI suivant z dans un champ de 1.2 T, puis une autre suivant x dans un champ plus faible. Sur la figure II-16 sont représentés les diagrammes de désaimantation thermique qui ont suivi. Les rapports  $K1/K3$  d'anisotropie d'ATR de ces échantillons varient entre 1.46 et 1.09, et peuvent être considérées comme représentatifs de la gamme de variation observée sur les terres cuites.

Cette analyse nous a permis de définir leur composition magnétique comme un mélange en proportion variable de deux constituants principaux :

- un se saturant dans des champs de 200 à 300 mT et se désaimantant vers 550°C environ (assimilé à de la magnétite ou de la titanomagnétite à faible teneur en titane),
- un minéral magnétique non saturé dans des champs de 1200mT mais se désaimantant rapidement jusqu'à 250°C (ces caractéristiques sont insuffisantes pour identifier un minéral magnétique particulier),

L'examen conjugué des figures de désaimantation des ARI croisées et des rapports d'anisotropie de ces échantillons (fig. II-16) ne met pas en évidence de relation entre anisotropie d'ATR et une de ces deux phases minéralogique.

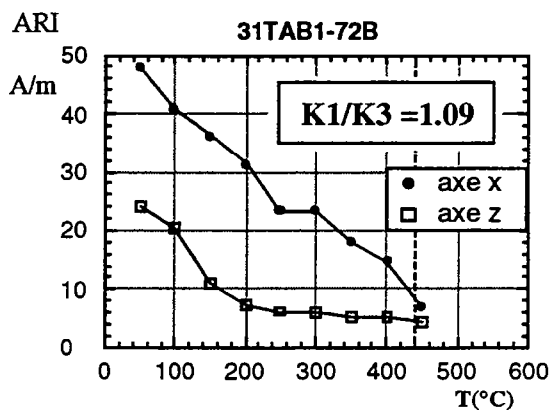
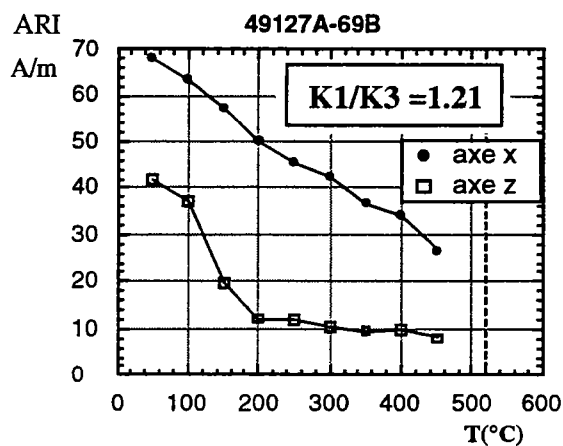
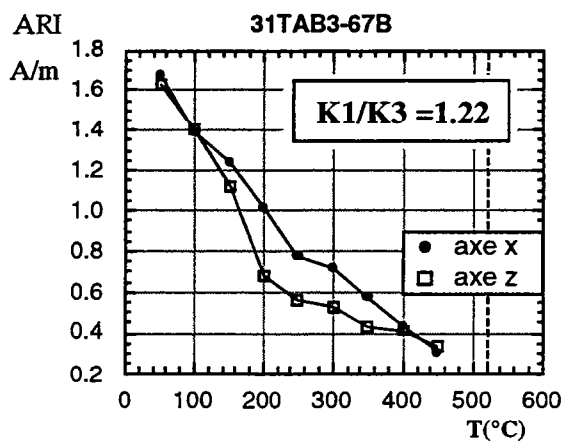
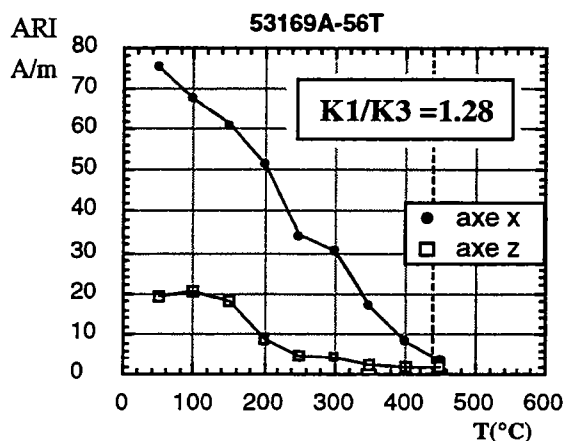
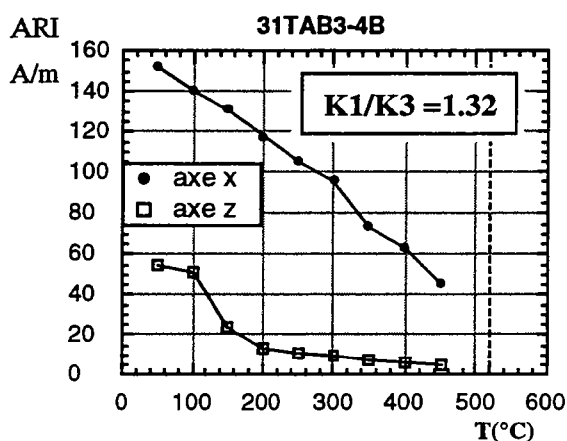
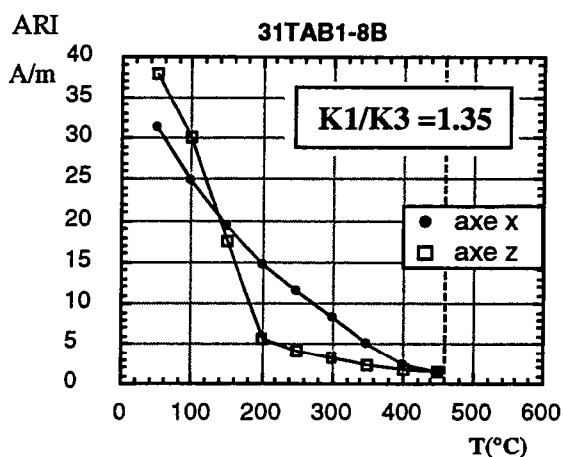
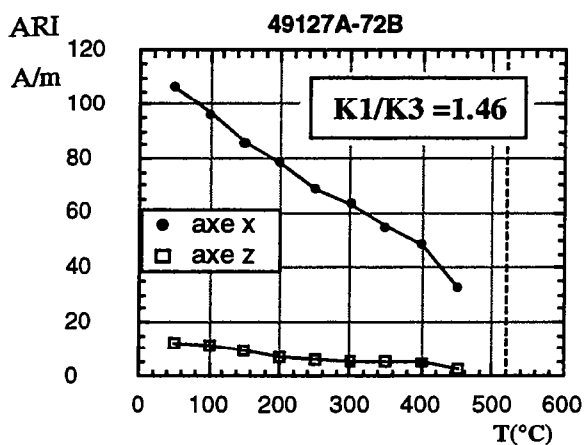


fig. II-16 : figures de désaimantation thermique des ARI croisées. Les figures sont classées en fonction de la valeur décroissante du rapport  $K1/K3$  d'anisotropie d'ATR.

- le champ utilisé selon l'axe  $zz'$  de l'échantillon est de 1200mT. La valeur du champ utilisé ensuite selon l'axe  $xx'$  varie selon les cas : 130mT (lot 49127A et lot 53169A), 160mT (lot 31TAB3) ou 190mT (lot 31TAB1).

- en pointillé, température de détermination du tenseur d'anisotropie d'ATR.

## II-4-2 Essais complémentaires sur l'origine de l'anisotropie d'ATR dans les terres cuites

Nous avons cherché à étudier expérimentalement quel est l'effet du moulage, ou l'effet de l'application momentanée d'une pression verticale sur les pâtons d'argile, sur l'anisotropie magnétique. Nous pouvons imaginer que la pression exercée, afin de réduire la hauteur du paton à celle du moule, n'est pas particulièrement élevée. En effet les techniques anciennes de confection de briques ou tuiles, employaient un moule à l'intérieur duquel était placé l'argile. Les seules pressions appliquées étaient probablement d'origine humaine. La technique dite de l'extrusion, avec passage forcé de l'argile à travers une filière, est tardive et ne concerne pas le Moyen Âge ou les temps gallo-romains. Pourtant de fortes valeurs d'anisotropie d'ATR sont remarquées dans les matériaux de ces époques.

Nous avons donc étudié l'effet de la réduction de hauteur dans l'acquisition de l'anisotropie d'ATR.

L'expérience a été menée à partir d'argile trouvée dans un des bassins de décantation du site gallo-romain de Sallèles d'Aude, et gracieusement fournie par F. Laubenheimer, responsable scientifique du site.

De trois pâtons, de même volume et de même hauteur de départ, deux ont été réduits à des hauteurs différentes. En fonction de cette hauteur ils sont respectivement notées h3 (hauteur de départ,  $3 \times 22 = 66\text{mm}$ ), h2 (hauteur finale  $2 \times 22 = 44\text{mm}$ ) et h1 (de hauteur finale  $22\text{mm}$ ).

Ces pâtons ont par la suite été partagés en deux : une moitié a été cuite (série S93-c) à  $1000^\circ\text{C}$  et l'autre a été conservée sous forme d'adobe (série S93). De chacune de ces moitiés ont été extraits les échantillons (par carottage avec circulation d'eau pour ceux qui étaient cuits, avec circulation d'air comprimé pour les autres). Suite à des problèmes de carottage, il n'y a pas de série S93-c-h3.

Chacun de ces échantillons a fait l'objet d'une première mesure de susceptibilité (en champ faible et à température de pièce,  $T \approx 20^\circ\text{C}$ ), et d'anisotropie de susceptibilité, notée S20 (mesurée au DIGICO). Vu la faible susceptibilité des échantillons d'adobe, la fiabilité des mesures est moyenne du fait de la mauvaise qualité du rapport signal/bruit.

### Conditions de la cuisson à $1000^\circ\text{C}$

Le choix du profil de montée en température (tableau II-8 et fig. II-17) a été réalisé avec l'aide et les conseils de Marie-Yvane Daire du Laboratoire d'Anthropologie de Rennes I (UMR 153).

Les échantillons de la série S93-C ont été cuits, à  $1000^\circ\text{C}$  environ, dans un four de potier électrique du laboratoire d'Archéométrie (UMR 153). Pendant toute la chauffe, les prises d'air situées au bas du four étaient ouvertes ainsi que la cheminée, assurant ainsi une circulation continue d'air, et

une cuisson en atmosphère oxydante. Lors du refroidissement ces ouvertures ont été fermées, mais sans être étanches. La circulation d'air était donc réduite mais non nulle.

L'aimantation acquise après cuisson est très faible (de l'ordre de  $3.10^{-2}$  A/m).

Durée de la chauffe	Durée de l'intervalle	T
H	H	°C
0.00	0.00	30
0.40	0.40	50
0.75	0.35	70
2.92	2.17	95
3.10	0.18	130
3.55	0.45	170
4.82	1.27	205
6.35	1.53	330
7.85	1.50	550
9.03	1.18	695
11.10	2.07	990
arrêt de la chauffe, début du refroidissement		
11.27	0.17	890
23.43	12.16	240
30.27	6.84	150

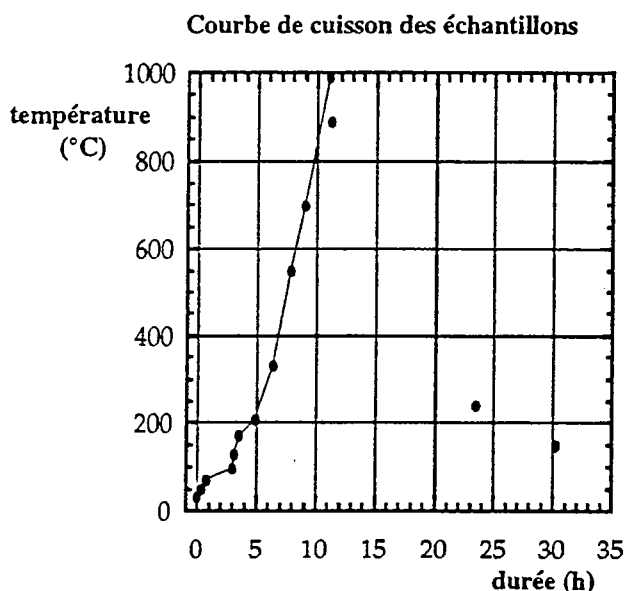


tableau II-8 (et fig. II-17) : tableau (et figure) résumant les diverses étapes de la cuisson des échantillons. **Durée de la chauffe**, intervalle temporaire entre le début de la chauffe et le début de l'étape considérée, **Durée intervalle**, intervalle temporaire entre deux étapes thermiques, montée en palier comprise, **T**, température cible.

### Procédure d'acquisition de l'ATR

Trois étapes de température ont été choisies : 200, 400 et 600°C. L'acquisition s'est effectuée au Laboratoire de Géophysique, avec le matériel utilisé pour la détermination de la paléointensité, dans un champ de 50μT et air libre. La durée de chauffe est de 1h30 et la durée du refroidissement, en balistique, inférieure ou égale à 1h15.

Une chauffe unique est suffisante pour déterminer la valeur d'ATR sur un axe, car l'ARN des échantillons d'adobe, ou cuits, peut être considérée comme nulle.

### Caractéristiques magnétiques

Toutes les informations sont réunies dans le tableau suivant (tableau II-9). Une première constatation s'impose : la chauffe préalable à 1000°C, modifie le spectre des températures de blocage. Durant cette chauffe les minéraux formés ont une susceptibilité magnétique beaucoup plus élevée que



celle des minéraux de départ, et l'ATR acquise est beaucoup plus forte que celle des échantillons d'adobe (échantillons de la série S93c comparés à ceux de la série S93h).

échantillon	anisotropie d'ATR						susceptibilité			
	T	ATR moyen	ATR/ATR600	bouclage	K1/K2	K1/K3	$\chi$	étape	K1/K2	K1/K3
	°C	$10^{-1}$ A/m	%	%			$10^{-5}$ SI			
S93ch1 (précuit à 1000°C)	20	0.4					274	S20	1.03	1.11
	200	2.5	57	2			274			
	400	3.6	93	0			286			
	600	3.7	100	2	1.05	1.09	282	S600	1.02	1.08
S93ch2 (précuit à 1000°C)	20	0.2					328	S20	1.03	1.09
	200	2.9	59	5			329			
	400	4.4	93	-0			343			
	600	4.7	100	2	1.05	1.06	339	S600	1.02	1.06
S93h1 (adobe)	20	0.009					18	S20	1.02	1.08
	200	0.07	8	2			18			
	400	0.3	40	4			28			
	600	0.8	100	6	1.04	1.21	30	S600	1.03	1.11
S93h2 (adobe)	20	0.02					17	S20	1.02	1.06
	200	0.08	7	2			19			
	400	0.3	38	5			29			
	600	0.9	100	6	1.06	1.18	32	S600	1.02	1.08
S93h3 (adobe)	0	0.007					20	S20	1.01	1.07
	200	0.07	8	4			21			
	400	0.3	38	2			32			
	600	0.8	100	6	1.01	1.09	31	S600	1.04	1.07

tableau II-9 : étude expérimentale de l'anisotropie. échantillon, numéro de l'échantillon, T, température utilisée pour le calcul de l'anisotropie d'ATR, ATR mesurée aux différentes étapes, ATR/ATR600, rapport entre l'ATR acquise à la température T et l'ATR acquise à 600°C, selon l'axe z de l'échantillon, bouclage, évolution de l'intensité d'ATR, exprimée sous forme de pourcentage, entre la première et la dernière chauffe, selon le même axe, en fin de cycle à la température T, K1/K2, K1/K3, rapport des valeurs propres du tenseur d'anisotropie d'ATR ou d'ASM,  $\chi$ , susceptibilité mesurée en champ faible et à température ambiante, étape, position, avant (S20) ou après (S600) la mesure d'anisotropie d'ATR.

#### Effet de la réduction de hauteur sur l'anisotropie d'ASM

échantillons d'adobe : les valeurs des rapports K1/K3 sont faibles et atteignent au maximum 11%. Ces valeurs sont quasiment équivalentes pour les trois échantillons que ce soit avant (étape S20) ou après (S600) application des chauffes successives pour le calcul de l'anisotropie d'ATR.

Les deux échantillons, S93h2 et S93h1, un peu plus comprimés, présentent un plan de facile aimantation disposé dans le plan xy de l'échantillon. L'axe de valeur propre minimale (K3) est parallèle à l'axe de compression (axe z de l'échantillon).

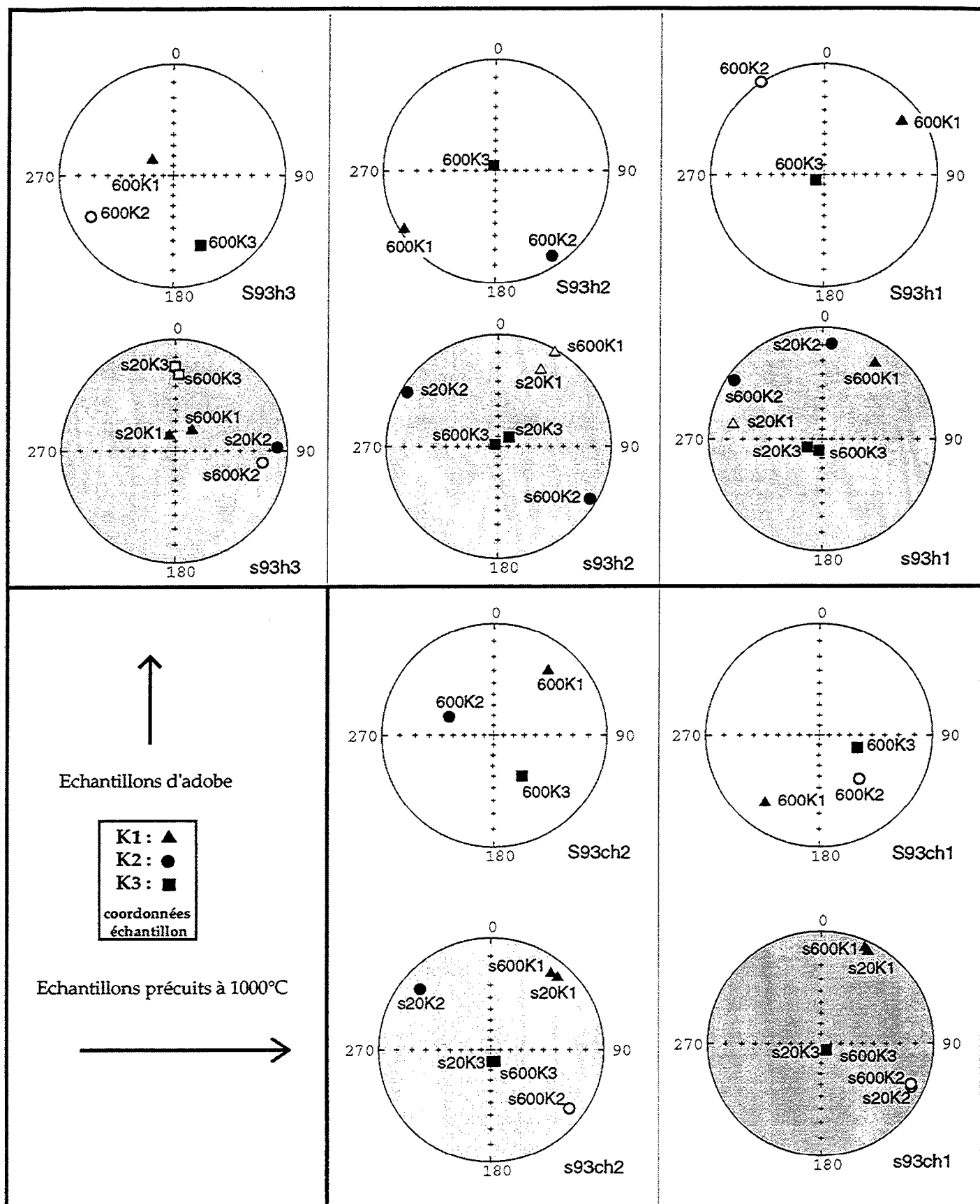


fig. II-18 : projections stéréographiques des tenseurs d'anisotropie d'AMS (fond gris) et d'ATR (fond blanc), en coordonnées échantillon. Les échantillons S93ch1 et S93ch2 sont déjà préculs. Triangle, vecteur propre maximal, ronds, vecteur propre intermédiaire, carré, vecteur propre minimal.

- anisotropie d'ATR : les chiffres indiquent la gamme de température pour laquelle le tenseur a été calculé.
- anisotropie d'ASM : le chiffre 20 indique les mesures d'ASM avant les chauffages d'anisotropie d'ATR. Le chiffre 600 indique les mesures effectuées après calcul d'anisotropie d'ATR.

L'axe de valeur propre maximale (K1) de l'échantillon S93h3 est parallèle à l'axe z de l'échantillon (fig. II-18).

échantillons cuits à 1000°C : pratiquement aucune différence n'est observée dans les rapports K1/K3 d'AMS, avant ou après les chauffes d'anisotropie. Ces rapports sont proches des valeurs obtenues sur les échantillons d'adobe.

La disposition des directions de vecteurs propres K3 est même identique avec celle des échantillons d'adobe de même hauteur.

#### **Effet de la réduction de hauteur sur l'anisotropie d'ATR**

Les valeurs de bouclages ne sont pas trop importantes et n'atteignent que 6% après des chauffes à 600°C. Nous prenons cette étape de température comme la plus représentative du spectre d'ATR.

Nous voyons une progression du rapport K1/K3 au fur et à mesure de la diminution de hauteur, de S93h3 à S91h1 (tableau II-9).

Nous observons pour les deux échantillons de hauteur réduite, S93h2 et S93h1, une disposition analogue, avec un axe minimal du tenseur sub-parallèle à l'axe de compression (axe z de l'échantillon). L'échantillon le moins comprimé, S93h3 présente des axes de K3 et K2 peu inclinés par rapport au plan de l'échantillon. L'axe maximal, K1, est le plus près de l'axe z de l'échantillon. On retrouve là la disposition déjà observée avec les tenseurs d'anisotropie d'AMS.

Les échantillons qui ont été préalablement cuits à 1000°C présentent d'excellents tests de bouclage. S93ch1 et S93ch2 ne montrent pas de différence notable entre eux, malgré leur différence de hauteur. Les valeurs de K1/K3 sont plus faibles que celles des échantillons d'adobe de même hauteur. Elles sont, par contre, proches de la valeur trouvée pour S93h3, échantillon qui, rappelons le, a conservé sa hauteur d'origine.

Sur les échantillons cuits (S93ch1 et S93ch2) nous notons un décalage de 30 à 40° entre l'axe de compression et la direction du vecteur propre K3.

#### **II-4-3 Conclusion**

Nous avons essayé de tirer quelques renseignements sur l'origine du comportement anisotrope de nos échantillons.

Nous n'avons pas mis en évidence de lien entre l'anisotropie d'ATR et les diverses caractéristiques magnétiques que sont la susceptibilité en champ faible, les valeurs de TDM, ou les analyses d'ARI croisées.

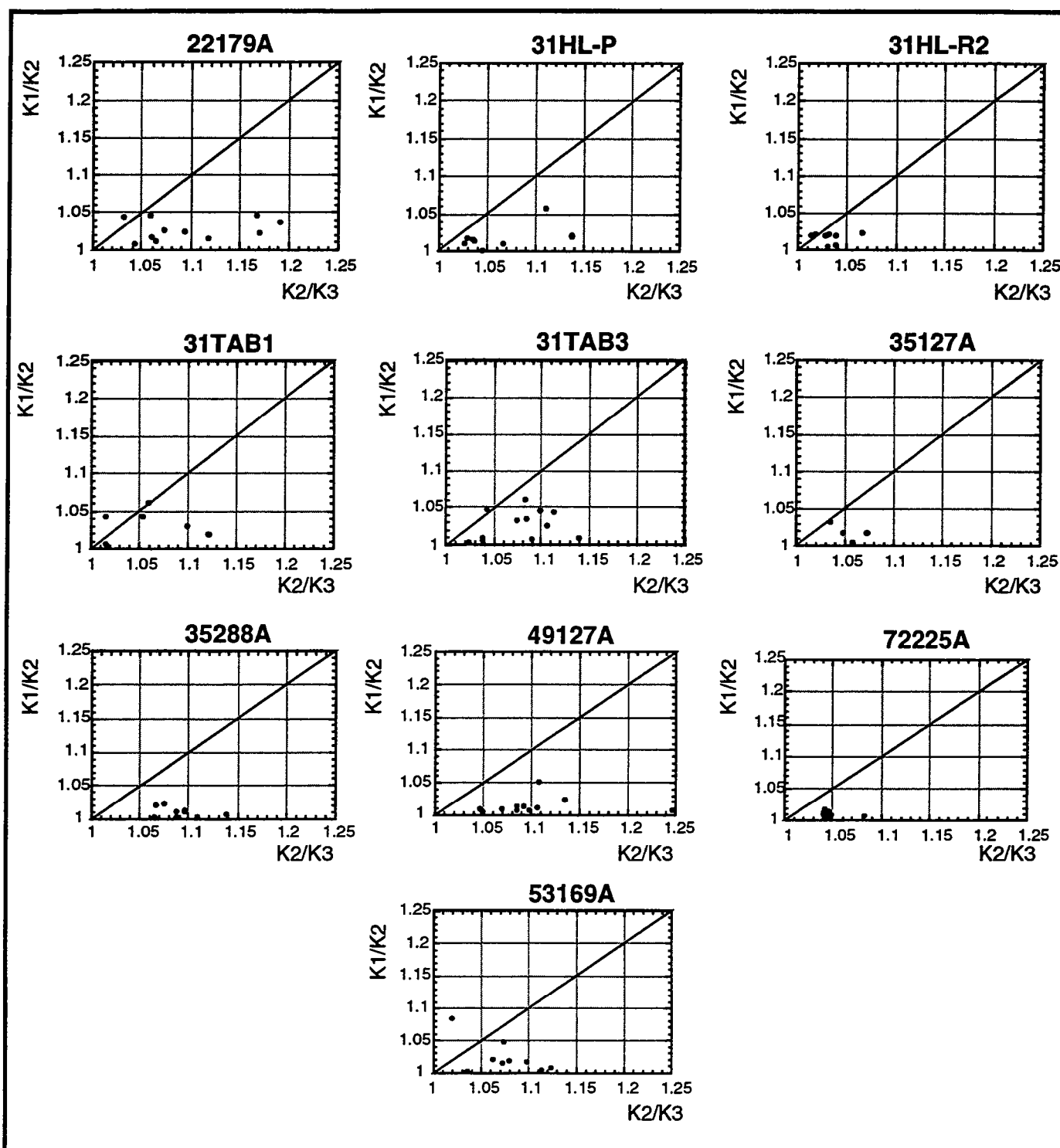


fig. II-19 : diagrammes de relation linéation / foliation ( $K1/K2 = f(K2/K3)$ ), dits diagrammes de Flinn, des échantillons provenant des lots prélevés sur du matériel déplacé.

L'effet du moulage, tel que nous l'avons expérimenté, n'est pas spectaculaire sur le degré d'anisotropie des tenseurs d'AMS puisque ce rapport est retrouvé quasi identique d'un échantillon à l'autre quelle que soit sa hauteur et qu'il soit d'adobe ou cuit à 1000°C. Par contre, si nous tenons compte de la distribution des axes de vecteurs propres d'AMS, dans tous les cas les échantillons réduits de moitié, ou de 2/3 de hauteur, présentent un plan de facile aimantation.

Sur l'ATR, nous pouvons observer, comme pour l'AMS, que la réduction de hauteur serait accompagnée d'un glissement des axes de tenseur, avec un axe minimum tendant à se placer en parallèle à l'axe de raccourcissement (S93h1 par rapport à S93h2). Dans tous les cas la compression a pour effet d'augmenter le degré d'anisotropie.

Nous ne pouvons pas parler de preuve expérimentale de l'action de la fabrication sur l'acquisition de l'anisotropie dans les terres cuites.

Cependant certains faits répétitifs nous intriguent :

- dans nos déterminations, les diagrammes Linéation (K1/K2) - Foliation (K2/K3), ou diagrammes de Flinn, des lots de matériel déplacé indiquent plutôt une tendance planaire de la fabrique magnétique (fig. II-19), c'est à dire une disposition préférentiellement en plans parallèles des grains,

- la fréquence des observations d'un tenseur d'anisotropie (d'ATR ou d'AMS) dans une disposition proche des axes de symétrie (longueur, largeur, épaisseur des briques, tuiles ou carreaux) ou des directions d'étirement de la pâte (pièces tournées) des pièces manufacturées (Rogers & al., 1979, Aitken & al., 1981, Veitch & al., 1984, Lanos, 1987) est tout de même importante.

Il est donc très tentant d'associer la genèse de l'anisotropie des terres cuites avec leur mode de fabrication. L'organisation des grains serait donnée suite aux diverses opérations de préparation et de mise en forme de l'objet.

## **II-5 Action de la vitesse de refroidissement sur l'acquisition d'ATR**

Les travaux de Néel, dès 1949, mirent en évidence une relation entre vitesse de refroidissement et acquisition d'ATR.

Cette particularité physique redevint d'actualité dans les années 1980, avec l'arrivée dans les laboratoires de paléomagnétisme de magnétomètres cryogéniques. Ces appareils, qui utilisent des sondes supraconductives sont suffisamment sensibles pour mesurer de faibles aimantations, comme celles portées par de petits échantillons par exemple.

Cette caractéristique a permis d'apporter de nouvelles solutions dans le développement des techniques de détermination d'intensité : les petits échantillons, vu leur faible volume, ont une faible inertie thermique et permettent des chauffages et des refroidissements très rapides, diminuant ainsi les

risques d'évolution minéralogique. Par la même occasion, l'emploi de carottes de faibles dimensions, moins dégradantes pour les objets archéologiques, élargit les possibilités d'échantillonnage. On comprend donc le bon accueil que reçut ce matériel pour les études d'archéointensité.

De nombreux résultats d'archéointensité furent alors publiés avec pour principale caractéristique de fortes valeurs d'intensité dans le passé. Ces résultats furent toutefois perçus comme surprenants. La comparaison, avec d'autres obtenus à partir de l'étude d'échantillons de dimension conventionnelle, refroidis plus lentement, mis au jour des différences non négligeables (Walton, 1984).

La vitesse de refroidissement semblait donc susceptible d'introduire un biais dans la détermination de l'intensité.

## II-5-1 Rappels théoriques

Les travaux théoriques, visant à modéliser l'évolution de l'intensité de l'ATR en fonction de la vitesse de refroidissement, se scindent en deux cas principaux selon la dimension de grains étudiés : grains monodomaines (Single Domain, SD), ou, grains polydomaines (Multi Domain, MD).

### Notion de temps de relaxation

Soit un échantillon constitué d'un ensemble de grains SD, de volume unique. L'aimantation rémanente,  $J_r(0)$ , mesurée à l'instant  $t=0$ , de cet échantillon va se désaimanter progressivement, de façon spontanée, du fait de l'agitation thermique qui agit sur ces grains de petites tailles. On définit le temps de relaxation  $\tau$  tel qu'à l'instant  $t=\tau$  l'aimantation rémanente,  $J_r(t)$ , mesurée est telle que (Néel 1949) :

$$J_r(t) = J_r(0) \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) = \frac{J_r(0)}{e} \quad f. II-10$$

où  $e=e^1$ .

Grâce à ses travaux, Néel a pu exprimer la valeur du temps de relaxation en fonction des caractéristiques magnétiques propres au grain :

$$\tau = \frac{1}{C} \cdot \exp\left(\frac{v \cdot h_c \cdot j_s}{2kT}\right) \quad f. II-11$$

où  $v$  est le volume du grain,  $h_c$ , la valeur de champ coercitif du grain,  $j_s$ , son aimantation spontanée,  $k$ , la constante de Boltzmann,  $T$ , la température absolue et  $C$  une constante  $\approx 10^8 s^{-1}$ .

## Définition de la température de blocage, $T_b$

La température est un facteur de contrôle important du temps de relaxation. Celle-ci intervient directement sous forme d'énergie thermique ( $kT$ ), mais interagit aussi par le biais de  $J_s$  (qui devient nulle à la température de Curie) et de  $h_c$ , qui sont tous deux "thermo-dépendants".

Plus la température augmente et plus le temps de relaxation diminue. A une température particulière  $T$ , le temps de relaxation,  $\tau$ , est tel que l'aimantation rémanente du grain devient instable et peut alors changer instantanément de direction. Le grain, de ferromagnétique devient superparamagnétique.

A l'inverse, au refroidissement, l'aimantation se "fige" lorsque le temps de relaxation  $\tau$  du grain est égal au temps durant lequel le système magnétique est à la température constante  $T$  (pour laquelle  $\tau$  est défini). Cette température, qui permet ce changement d'état, est appelée température de blocage du grain.

## Intensité d'ATR et vitesse de refroidissement

### A) ensemble de grains monodomaines

Soit un ensemble de grains monodomaines, de taille  $v$  identique, de température de blocage  $T_b$ , refroidis dans un champ magnétique d'intensité  $H$ , depuis une température supérieure à la température  $T_b$ , jusqu'à la température ambiante  $T_a$ .

L'intensité d'ATR (par unité de volume de matériel magnétique) mesurée à température ambiante ( $T_a$ ) est telle que (Néel, 1949) :

$$ATR(T_a) = J_s(T_a) \cdot \frac{v \cdot H \cdot J_s(T_b)}{3 \cdot k \cdot T_b} \quad f. II-12$$

où  $J_s(T)$  est l'aimantation spontanée à la température  $T$ , et  $k$  la constante de Boltzmann, ou plus simplement :

$$ATR(T_a) = ATR(T_b) \frac{J_s(T_a)}{J_s(T_b)} \quad f. II-13$$

$ATR(T_b)$  étant l'aimantation rémanente acquise à la température de blocage

## B) grains polydomaines

### Modèle de Néel, 1955

$$ATR(Ta) = \frac{H}{N} \cdot \frac{Js(Ta)}{Js(Tb)} \quad f. II-14$$

Nous retrouvons ici la valeur  $H$  de l'intensité du champ,  $Ta$ , la température ambiante,  $Tb$  la température de blocage des grains.  $N$  est le coefficient de champ démagnétisant des grains.

L'effet du champ démagnétisant se traduit ici par une diminution de l'intensité d'ATR.

### Modèle de Merrill, 1981

$$ATR(Ta) = \frac{Js(Ta)}{Js(Tb)} \left[ \frac{\beta \cdot J_s^n(Ta) + H}{A} \right]^{\frac{1}{m}} \quad f. II-15$$

$A$ ,  $\beta$ ,  $n$  et  $m$  sont des constantes, définies expérimentalement.

## II-5-2 Evaluations de l'action de la vitesse de refroidissement

La température de blocage est fonction de la vitesse de refroidissement. Pour une configuration donnée de refroidissement, correspond un couple de valeur ( $\tau$ ,  $T$ ). Si le refroidissement est plus lent, la durée  $t$  de palier de température  $T$  est plus importante ( $t > \tau$ ) et l'aimantation du grain n'est pas bloquée. Pour que le grain voit son aimantation figée, il faut que la température du système diminue jusqu'à atteindre une nouvelle valeur  $T'$  telle que  $\tau'$  et durée de palier à  $T'$  soit égaux.

Si  $Tb$  diminue,  $ATR(Tb)$  et  $Js(Tb)$  augmentent toutes les deux mais  $ATR(Tb)$  plus rapidement que  $Js(Tb)$ .

Selon les formules de Néel, ceci a pour conséquence d'augmenter l'ATR pour les grains monodomaines ou de la diminuer pour les grains polydomaines. La formulation de l'ATR dans les grains polydomaines, selon Merrill (f. II-20) permet de prédire les deux possibilités :

- si  $n/m > 1$  alors l'ATR augmente.
- si  $n/m < 1$  alors l'ATR décroît.



## Evaluations théoriques dans le cas des monodomains

En introduisant des valeurs dans les différentes variables des formules présentées précédemment, il est possible de calculer des valeurs théoriques de rapport entre ATR acquise en refroidissement lent et ATR acquise en refroidissement rapide :

- Dodson et Mc Clelland (1980) ont prédit un gain de 5% pour un rapport entre vitesses de refroidissement d'ordre 10,
- pour le même rapport, Walton (1980) calcule un gain de 6% pour de la magnétite et de 3% pour de l'hématite.

## Données expérimentales

### Expériences de Fox & Aitken (1980)

Deux types d'échantillons de terre cuite ont été successivement aimantés (et réaimantés) : certains de "grande" taille ( $\phi=25\text{mm}$ ,  $h=8\text{mm}$ ) et d'autres de "petite" taille ( $\phi=3\text{mm}$ ,  $h=3\text{mm}$ ) de faible inertie thermique, dont l'aimantation a été mesurée sur un magnétomètre cryogénique.

Les résultats suivants sont obtenus :

- un refroidissement en 30mn des "grands" échantillons amène une surestimation de 6 à 12% de l'intensité obtenue dans des conditions de refroidissement en 7 heures,
- deux essais d'acquisition d'aimantation, avec refroidissement rapide (de 600°C à température ambiante en quelques minutes), permettent d'obtenir deux ATR égales pour les "petits" échantillons,
- par contre, pour ces mêmes échantillons, un refroidissement lent (de 600°C à température de pièce en 2.5h) amène à l'acquisition d'une ATR supérieure de 5% à celle acquise en refroidissement rapide.

Fox & Aitken en concluent que des refroidissements de durée maximale 30 mn (tels que ceux utilisés dans leur laboratoire, les échantillons étant mesurés au magnétomètre cryogénique) pourraient amener à une surestimation des intensités de 10 à 20% si le matériel archéologique avait été refroidi au minimum en deux jours.

### Mc Clelland Brown (1984)

Dans le même esprit que les expériences réalisées par Fox et Aitken (1980), Mc Clelland Brown a essayé de mettre en relation l'effet de la vitesse de refroidissement et la dimension des grains magnétiques. Elle a pour cela réalisé des échantillons synthétiques à base de titanomagnétite et magnétite.

Tous ont été refroidis à l'air dans un champ de  $42.5\mu\text{T}$ , durant 2.5h. Dans un second temps, ils ont été réchauffés par étapes croissantes de température, dans les mêmes conditions expérimentales, excepté le refroidissement, réalisé en trois minutes.

Une seconde série de tests a été effectuée (acquisition d'une ATR totale, suivie par des acquisitions d'ATR partielles) mais dans un contexte de refroidissement rapide cette fois.

Dans le cadre des magnétites monodomaines, l'ATR est plus importante lorsqu'elle est acquise en refroidissement lent, ceci tant que la concentration en magnétite n'est pas trop élevée. Le gain d'aimantation est de 15% pour un échantillon à 0.19% pondéral de magnétite, et varie entre 0 et 5% pour le second échantillon à 2.14% de magnétite, testé deux fois.

Par contre tous les échantillons à titanomagnétite (PSD ou polydomaines dans ces expériences) montrent une ATR plus importante lorsque le refroidissement est rapide. La différence allant de 40 à 600% !

#### Goulpeau, Lanos & Langouët (1989)

Ceux-ci ont réalisé quelques expériences quant à l'effet de la vitesse de refroidissement lors de la détermination du tenseur d'anisotropie d'ATR. Les échantillons, extraits de briques refroidies de  $1200^\circ$  à  $30^\circ\text{C}$  en 60 heures environ, ont successivement été refroidis à des vitesses différentes. Une aimantation d'intensité en moyenne 11% plus faible est obtenue avec une vitesse (moyenne) de refroidissement de  $2500^\circ/\text{h}$ . Un refroidissement de vitesse moyenne  $120^\circ/\text{h}$ , ramène cet écart à  $\approx 1.6\%$  seulement.

#### Chauvin (1989)

Les échantillons (au nombre de 6) proviennent de coulées basaltiques. Ils ont été sélectionnés pour leur forte résistance au champ alternatif et leur point de Curie élevé, caractéristiques magnétiques similaires à celles d'une composition de grains monodomaines.

Trois types de refroidissement différents ont été utilisés :

- un refroidissement rapide ( $500$  à  $400^\circ\text{C}$  en  $\approx 2\text{mn}$ ,  $400$  à  $300^\circ\text{C}$  en  $\approx 4\text{mn}$ ,  $1\text{h}15\text{mn}$  au total pour atteindre la température de pièce),

- un refroidissement plus lent, suivant l'inertie thermique de l'ensemble four et échantillons, four en place, mais chauffe coupée ( $500$  à  $400^\circ\text{C}$  en  $\approx 30\text{mn}$ ,  $400$  à  $300^\circ\text{C}$  en  $\approx 1\text{h}$ ,  $8\text{h}$  au total pour atteindre la température de pièce),

- un refroidissement très lent,  $1^\circ\text{C}/\text{mn}$  entre  $650$  et  $400^\circ\text{C}$ , puis égal au précédent pour la suite.

Ceux-ci ont été chauffés cinq fois (sous vide) et chaque refroidissement était différent, rapide, lent, rapide (1er bouclage), très lent et rapide (2e bouclage).

Le résultat est une évolution progressive de l'ATR, avec l'augmentation de la durée du refroidissement, pouvant atteindre 14% au maximum.

Aitken & al. (1991)

La différence entre refroidissement rapide (entre 5 et 20 minutes) et lent (la durée n'est pas précisée) amène une surestimation variant entre 3 et 13%.

Biquand (1994)

Biquand utilise pour ses expériences soit des échantillons à base de poudre CrO<sub>2</sub> à grains monodomaines, soit des échantillons extraits de basaltes océaniques contenant des titanomagnétites faiblement oxydées à grains de type PSD et polydomaines et de température de Curie basse.

Pour ces deux matériaux, et quel que soit le type de domaine magnétique concerné, l'intensité de l'ATR est trouvée croissante en fonction d'une durée croissante de refroidissement. Une différence de 19% d'ATR est obtenue entre un refroidissement lent (en 120h de 130 à 100°C) et un refroidissement rapide (en 30 mn), pour les échantillons à base de CrO<sub>2</sub>.

L'action est moins visible pour les basaltes et un exemple est cité où l'écart est de 6% seulement entre une ATR acquise en refroidissement lent (120h de 200 à 50°C) et une ATR acquise en refroidissement rapide (de durée entre 30 et 40 mn).

### Conclusion de ces expériences

L'action de la vitesse est variable selon la nature des grains concernés (tableau n° II-10).

matériel	gamme de chauffe		durée du refroidissement		ATR I/ATr <sub>r</sub>
	de °C	à °C	rapide	lent	
terres cuites	720°C	Ta	30'	7h	6% à 12%
terres cuites	600°C	Ta	5'	2.5h	5%
Magnétites monodomaine	600°C	Ta	3'	2.5h	entre 0 et 15%
Titanomagnétites polydomaines	600°C	Ta	3'	2.5h	entre -40 et -600%
basaltes	650	Ta	1h15	12H	14%
CrO <sub>2</sub> monodomaines	130	100	30'	120h	19%
basaltes polydomaines	200	50	30-40'	120h	6%

tableau II-10 : résumé des résultats obtenus par les divers auteurs précédemment cités, sur les effets de la vitesse de refroidissement dans l'acquisition d'ATR. **gamme de chauffe**, intervalle de température sur lequel s'est effectué l'acquisition de l'ATR, **Ta**, température ambiante, **durée du refroidissement**, du refroidissement rapide et du refroidissement lent, **ATR<sub>I</sub>/ATR<sub>r</sub>**, gain ou rapport de l'aimantation acquise en refroidissement lent sur l'aimantation acquise en refroidissement rapide.

Toutes ces expériences tendent à montrer qu'un refroidissement lent appliqué à un système magnétique à grains monodomaines augmente la valeur de l'ATR, la proportion variant avec la distribution en taille et concentration des grains, et donc d'un échantillon à l'autre.

Dans le cas de grains polydomaines ou pseudo-monodomaines les comportements ne sont pas aussi bien déterminés. Les gains d'ATR sont soit négatifs (Mc Clelland Brown) soit positifs (Biquand).

Il semble que la détermination du gain d'ATR soit non seulement sensible aux rapports entre vitesses de refroidissement, mais aussi sensible à la portion de spectre de température touché (Biquand).

Nos déterminations d'intensité sont réalisées à partir d'échantillons sélectionnés comme ayant des caractéristiques magnétiques d'échantillons à grains de type SD.

Dans nos expériences, les vitesses de refroidissement sont beaucoup plus élevés (de 600°C à température ambiante en 1h15) que dans les conditions initiales d'acquisition de l'aimantation, lors de la cuisson par exemple. Les potiers comptent habituellement la durée du refroidissement en jours, voire en semaines.

Nous pouvons quantifier (et corriger) une partie importante du biais introduit dans nos déterminations d'intensité, par la différence de vitesse de refroidissement, en effectuant des refroidissements de 600°C à température ambiante en 8 heures, soit une vitesse moyenne de refroidissement de 70°/h.

### **II-5-3 Mise en place de la procédure de mesure systématique**

L'aimantation est acquise toujours selon le même axe de l'échantillon (axe z en l'occurrence). On évite ainsi tout problème d'anisotropie d'ATR.

Toutes les chauffes et refroidissements ont été réalisés à l'air.

La vitesse habituellement appliquée en laboratoire, vitesse moyenne de 8°C/mn (de 600°C à température de pièce en 1H15), sera considérée par la suite comme un refroidissement "rapide" (noté R1 et R2).

Nous pouvons aussi provoquer un refroidissement "lent" (RL) d'une vitesse moyenne de 1°C/mn (de 600°C à température de pièce en 10H environ). Celui-ci est obtenu grâce à l'inertie thermique du four, laissé en place autour du tube, chauffe coupée.

La procédure expérimentale est la suivante :

- 1ère aimantation acquise en refroidissement rapide, notée R1,
- 2ème aimantation acquise en refroidissement lent : RL,
- 3ème aimantation, de contrôle, acquise en refroidissement rapide : R2.

La deuxième aimantation acquise en refroidissement rapide, R2, permet de calculer l'évolution au bouclage.

Tant que cette évolution reste nulle la formule de calcul de gain est simple.

Par contre si une évolution est détectée, comment réagir ? Nous risquons d'intégrer dans le calcul du gain une portion d'aimantation qui est en fait portée par des minéraux néoformés. La mesure R2 constitue un test de bouclage, mais, si elle permet de connaître qu'elle est l'évolution entre R1 et R2, elle ne permet pas de savoir quand celle-ci démarre. Car celle-ci a bien pu se déclencher entre R1 et RL, ou entre RL et R2.

Nous avons donc finalement préféré calculer le gain et l'évolution séparément. Si l'évolution est nulle ou significativement inférieure au gain calculé, alors la valeur de ce dernier est considérée comme réaliste. Si, à l'inverse, évolution et gain sont de même grandeur, ou que l'évolution est trouvée supérieure au gain, alors ce dernier est considéré comme non significatif.

Nous avons utilisé la formule suivante :

$$gain = \frac{RL - R1}{R1}$$

et l'évolution au bouclage est calculée à partir de la formule suivante :

$$bouclage = \frac{R1 - R2}{R1}$$

Dans la perspective de réduire l'exposition des échantillons aux chauffes, nous avons, dans un premier temps, calculé la correction de vitesse de refroidissement à partir du gain moyen établi sur un groupe d'échantillons, extraits du même lot, mais différents de ceux utilisés en intensité. Cette correction était alors appliquée uniformément à tous les échantillons du lot (procédure appliquée aux lots 11salf10 et 11salf14).

En fait, les échantillons montrant généralement une stabilité suffisante pour supporter ces chauffes répétitives, rajoutées aux chauffes destinées à la détermination de l'intensité, le gain et la correction ont par la suite été calculés spécifiquement pour chaque échantillon.

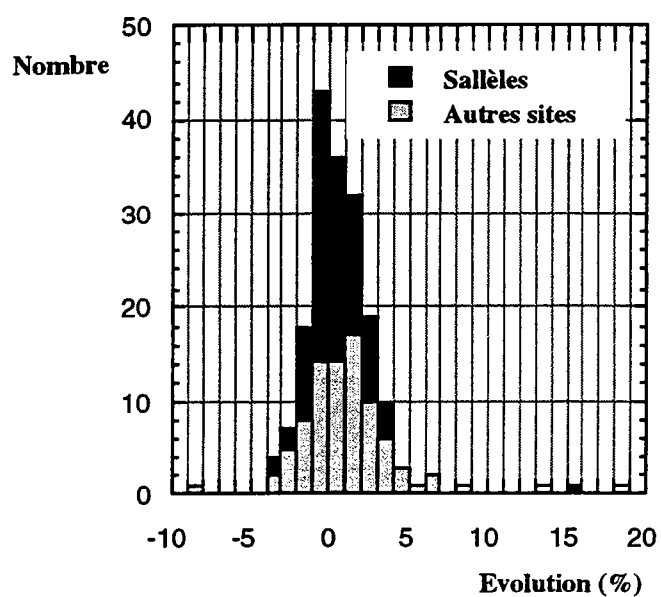


fig. II-20 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : histogramme des valeurs d'évolution constatée au bouclage, après calcul du gain en refroidissement lent.

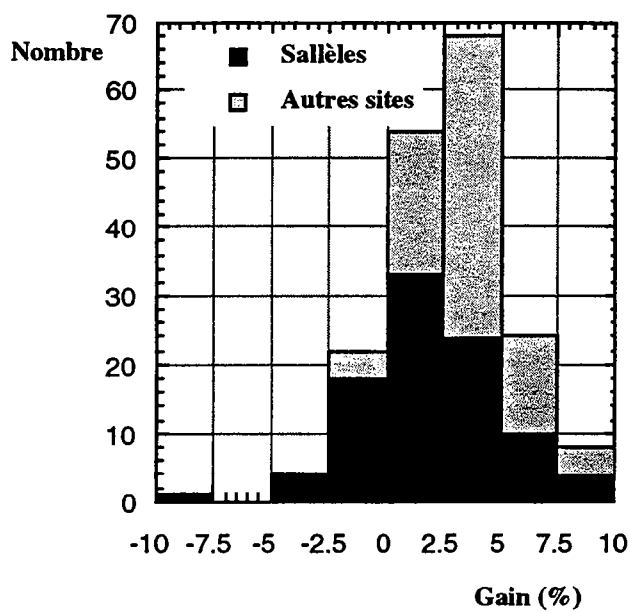


fig. II-21 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : histogramme des valeurs de gain.

Certaines expériences ont été réalisées au Laboratoire de Géomagnétisme de St Maur. Du fait du refroidissement très lent du four (12H environ), les intensités calculées à partir des échantillons alors utilisés n'ont pas été corrigées de l'effet de vitesse de refroidissement (première partie du lot 11salf7, et lots 11salf13, 22179A, 35127A et 35288A).

## Résultats

L'histogramme des valeurs de bouclage, tous échantillons confondus, (fig. II-20) se présente avec un mode unique. Sur 181 échantillons au total, seuls quatre ont une valeur absolue de l'évolution supérieure à 10%, et sept supérieure à +5%. La valeur moyenne est quasi nulle, inférieure au pourcentage ( $0.75 \pm 0.40\%$ ). Nous pouvons donc dire que le calcul des valeurs de gain s'est effectué dans de bonnes conditions expérimentales.

L'histogramme des valeurs de gain (fig. II-21) de tous ces échantillons est lui aussi monomodal, disposé entre -10 et +10%. La valeur moyenne est faible,  $2.66 \pm 0.40\%$ .

23 échantillons présentent des valeurs négatives de gain. Celles-ci sont plutôt faibles car un seul résultat est en valeur absolue supérieur à 5 %. Ces valeurs sont majoritairement trouvées dans les lots de Sallèles d'Aude.

## Relations entre variables

Testée lots après lots, l'indépendance de nos calculs de gain, par rapport aux conditions expérimentales telles que l'évolution, le pourcentage d'ATR acquise, ou encore la température de calcul semble vérifiée. Nous avons toutefois décidé de traiter la somme de ces informations, en cumulant les échantillons.

Aucun lien ne semble relier les valeurs de gains calculés avec les valeurs d'évolutions constatées (fig. II-22) : nous pouvions craindre un contrôle du gain d'ATR par l'évolution.

Valeurs de gain et ATR acquise lors du calcul sont indépendantes (fig. II-23). La distribution des valeurs de gain apparaît même homogène avec celle de l'ATR.

Il n'y a pas à proprement parler de lien entre les valeurs de gain et la température à laquelle elle a été calculée (fig. II-24). On remarque toutefois que les valeurs de gain négatives sont confinées à la gamme de température 350-450°C. Ces valeurs proviennent majoritairement des lots de Sallèles d'Aude.

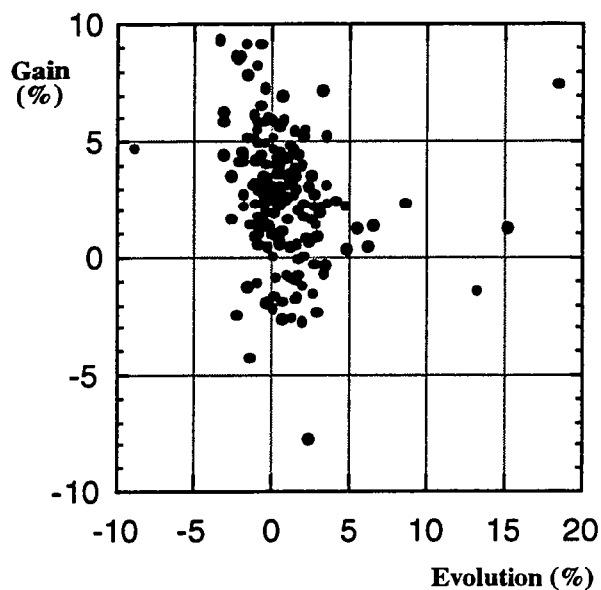


fig. II-22 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme des gains calculés en fonction de l'évolution constatée au bouclage.

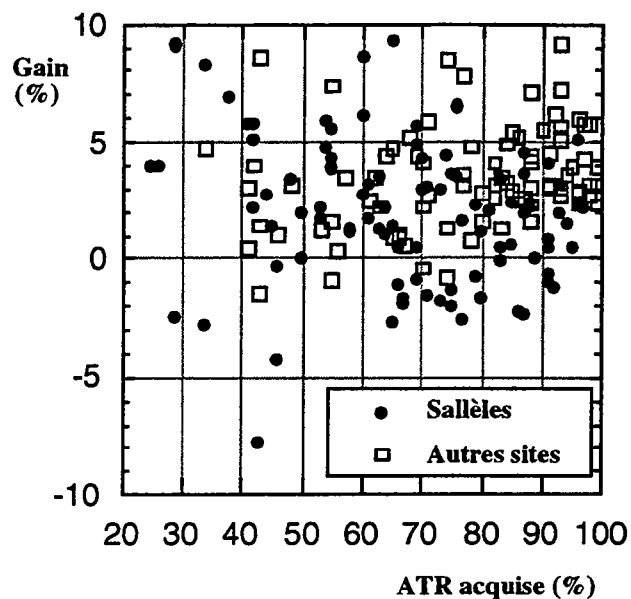


fig. II-23 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme des gains calculés en fonction de l'ATR acquise pour la détermination de l'archéointensité, à la température de calcul.

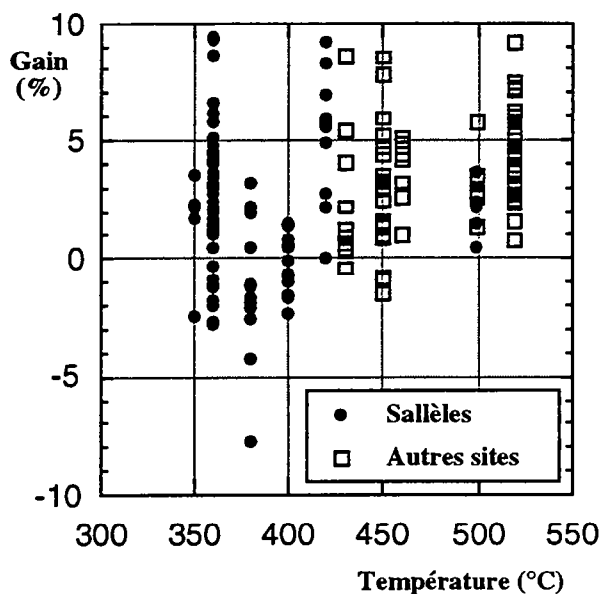


fig. II-24 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme des gains en fonction de la température de calcul.

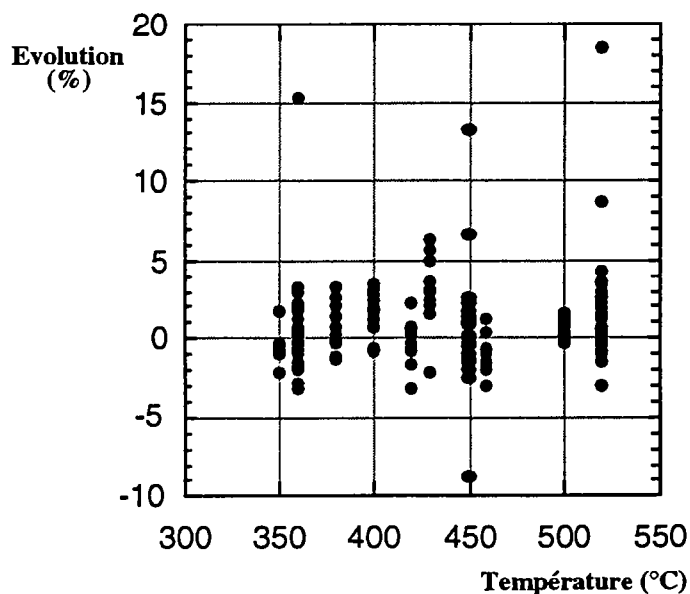


fig. II-25 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme de l'évolution constatée au fur et à mesure de l'élévation de la température.



Outre les valeurs de gain, nous observons aussi que l'évolution apparaît indépendante de la température (fig. II-25). Elle reste faible quelle que soit le degré de température atteint.

Enfin nous noterons qu'aucune relation n'est apparente entre évolution et pourcentage d'ATR acquise. L'évolution reste faible même pour des pourcentages élevés d'ATR. Nous pouvions craindre de dépasser les limites de stabilité des grains magnétiques de basse température de blocage.

### Relations entre caractéristiques magnétiques

Les valeurs de gain sont majoritairement positives, mais il existe quelques cas de gains négatifs, et ceci dans le cadre d'évolutions faibles. Ces valeurs sont surtout trouvées dans les échantillons provenant des lots de Sallèles d'Aude (lot d'amphores 11sal-A7 et four 11salf8 ou 11salf12). On note toutefois que ces valeurs restent faibles elles aussi (majoritairement inférieures à 5%).

Seule, Mc Clelland Brown, a trouvé des valeurs de gains négatifs, associés à des titanomagnétites PSD ou polydomaines.

Pouvons nous associer nos résultats avec une minéralogie magnétique particulière des échantillons ?

Comme nous l'avions déjà précédemment exposé (avec l'anisotropie d'ATR), nous connaissons mal la minéralogie magnétique de ces échantillons, et nous savons pratiquement rien sur la forme et la taille des grains, si ce n'est qu'en détermination d'intensité les échantillons ont un comportement "normal".

Nous avons tout de même testé s'il nous était possible de mettre en évidence un lien entre les valeurs de gains et quelques unes des caractéristiques magnétiques des échantillons concernés :

- la répartition des points entre gain et valeur d'ARN ne fait rien ressortir de particulier (fig. II-26), si ce n'est que les fortes valeurs de gain sont majoritairement trouvées vers les basses valeurs d'ARN. Mais cet effet peut être la conséquence de l'échantillonnage, qui est pauvre en échantillon d'aimantation élevée (volontairement d'ailleurs, puisque choisi avec de faibles valeurs d'ARN pour éviter les effets de forme),

- cette remarque est identique en ce qui concerne le diagramme du gain en fonction de la susceptibilité (fig. II-27). Les échantillons de forte susceptibilité sont moins fréquents,

- la répartition gain-valeurs de TDM est homogène, autant pour les valeurs positives que négatives, et ceci quelle que soit la température (fig. II-28).

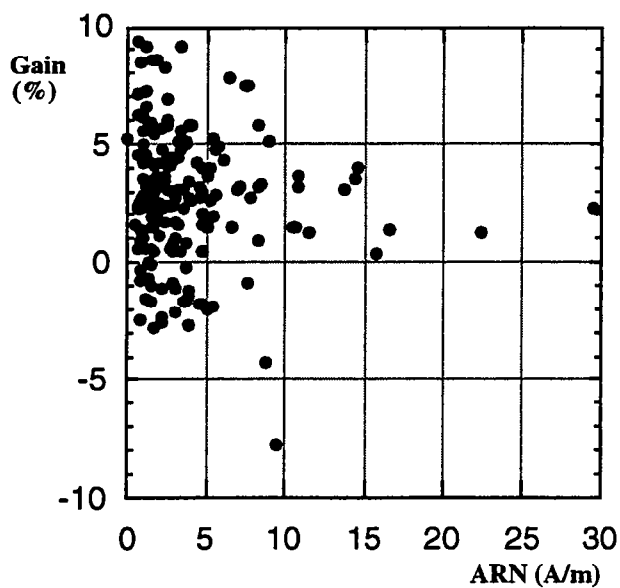


fig. II-26 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme des gains calculés en fonction de la valeur d'ARN mesurée avant toute opération.

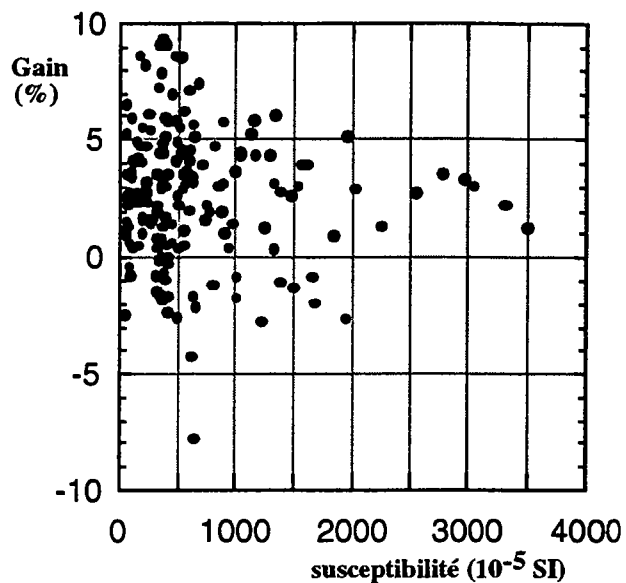


fig. II-27 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme des gains calculés en fonction de la susceptibilité mesurée en champ faible, à température de pièce.

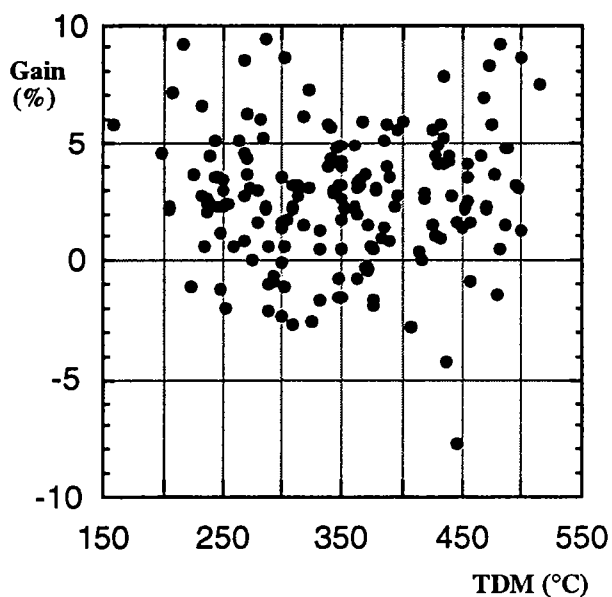


fig. II-28 : Lots utilisés pour la détermination de l'intensité : diagramme des gains calculés en fonction de la température de désaimantation moyenne de l'ARN. Seuls sont présentés les échantillons à aimantation monocomposante.

## II-5-4 Conclusion

Nous avons observé des variations de l'intensité d'ATR en relation avec les différentes vitesses de refroidissement.

Nous avons préféré utiliser des températures intermédiaires pour ces calculs de gain, lesquelles présentaient moins de risque d'évolution à nos yeux. Le choix de l'étape de température est effectué de façon à utiliser un fort pourcentage d'ATR, mais en restant dans les limites thermiques évitant l'évolution. Les résultats obtenus par la suite semblent conforter ce choix : les évolutions sont faibles. De ce fait les valeurs de gain bien que peu élevées sont significatives, 2.7% en moyenne.

Nous n'avons pas pu tester des refroidissements plus lents que 70 °/heure. De ce fait les corrections sont probablement sous-estimées.



## **Chapitre III**

**Etudes de l'archéointensité sur divers sites gallo-romains et "modernes", situés en France.**

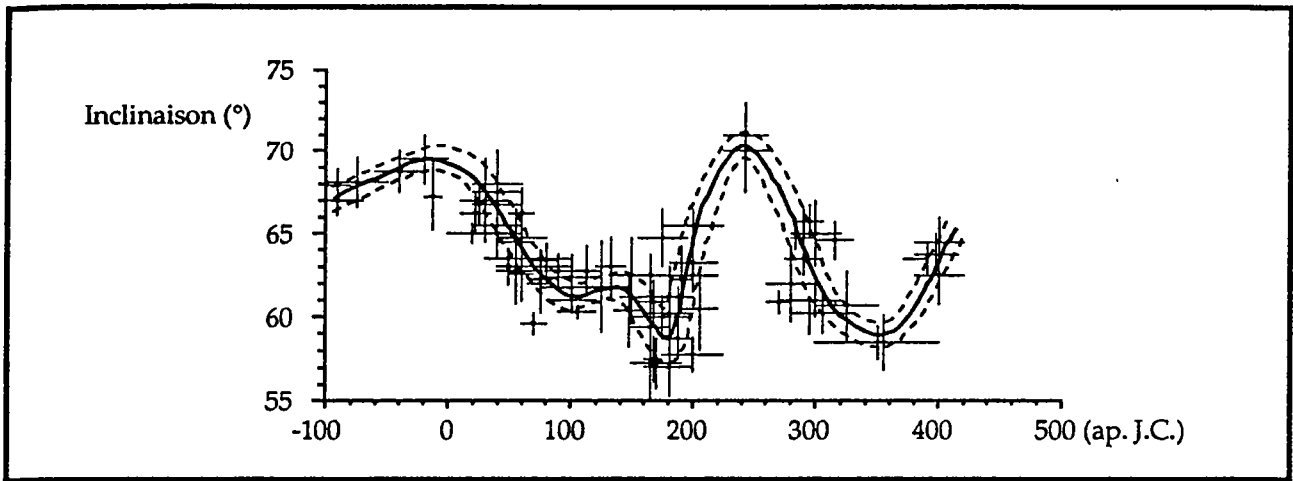


fig. III-1 : courbe de variation de l'inclinaison établie au Laboratoire d'Archéométrie (UMR 153) pour la période gallo-romaine, tracée "à la main" (Laubenheimer & Lanos, 1994).

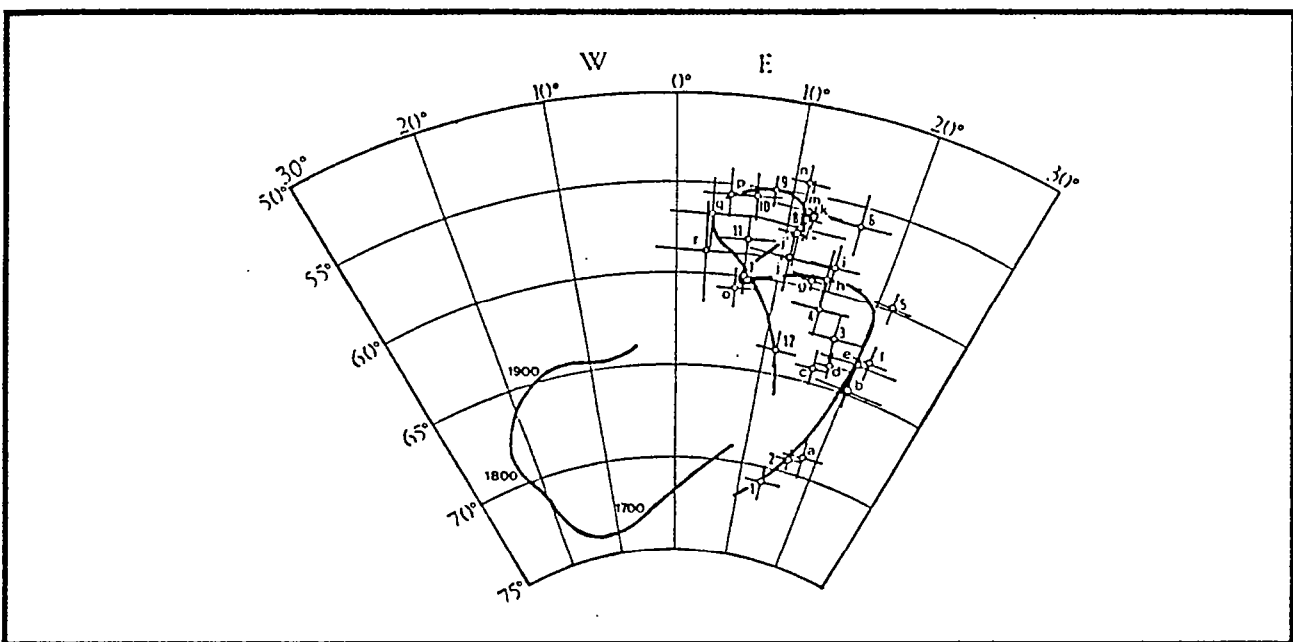


fig. III-2 : variation séculaire du champ magnétique à Paris: courbe proposée par Bucur en 1986.

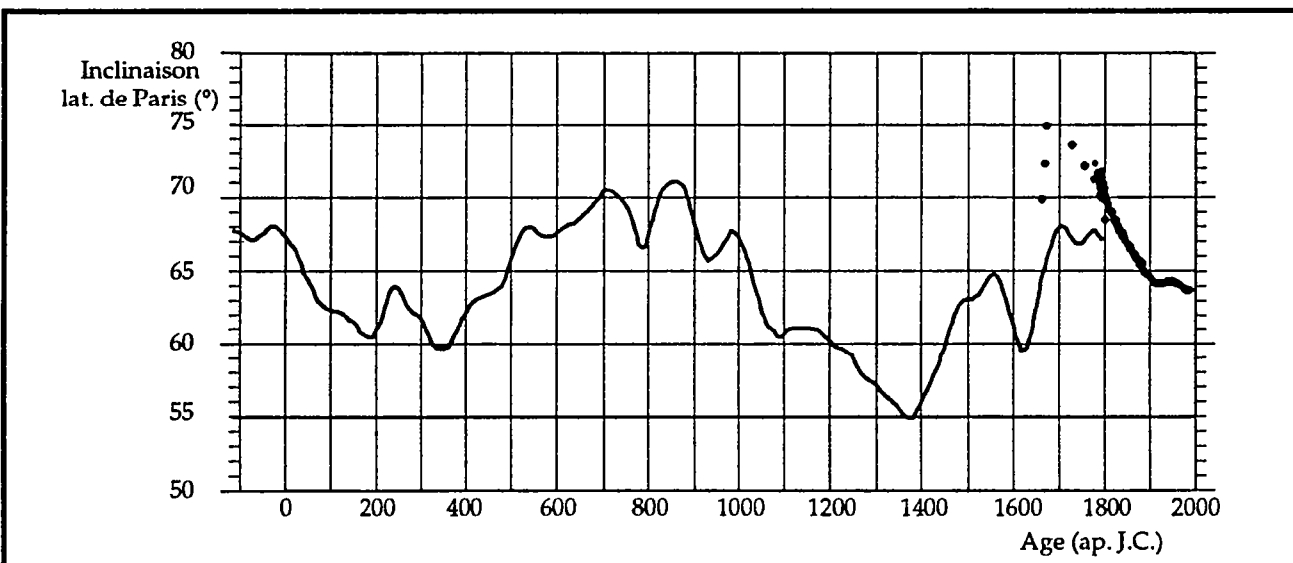


fig. III-3 : courbe de variation de l'inclinaison calculée à partir de l'ensemble des données référencées par Bucur 1996 et Lanos & al. (à paraître), par traitement mathématique de type spline cubique (cf. chapitre V). Le calcul de l'enveloppe d'erreur associé à la courbe spline moyenne est actuellement en cours de développement. Les points noirs marquent l'évolution de l'inclinaison connue à partir de mesures directes (com. pers. M. Alexandrescu)

### **III Etudes de l'archéointensité sur divers sites gallo-romains et "modernes", situés en France.**

#### **III-1 Introduction**

Nous avons cherché à travailler sur des lots d'âges proches, en succession continue, afin d'avoir une vision "précise" de la variation d'intensité sur des périodes courtes de temps. Le second but est d'étudier le comportement de l'intensité, à partir de lots ciblés, durant les périodes de variation importante de l'inclinaison (minimum en 180 ap. J.-C. ou maximum en 250 ap. J.-C. par exemple, Lanos, 1987a).

#### **III-2 Le problème de la datation des lots.**

Le problème principal de ce type de démarche est de réunir un nombre suffisant de lots de référence. Nous disposons à priori d'un large choix dans l'ensemble des échantillons disponibles au Laboratoire d'Archéométrie.

Ces échantillons présentent l'avantage d'avoir déjà été étudiés en archéomagnétisme de direction. Ainsi un premier tri, selon l'homogénéité des résultats obtenus, peut être effectué.

Le revers de cette situation est que ces lots sont pour la plupart analysés en archéomagnétisme parce que le contexte archéologique de la fouille est insuffisant à dater la strate ou l'événement étudié.

Nous avons alors sélectionnés des lots présentant de faibles incertitudes associées aux directions moyennes de l'aimantation. De plus leurs contextes archéologiques, ou leurs datations archéomagnétiques, sont argumentés, du moins dans l'état des connaissances où les rapports d'analyse ont été rédigés.

Les lots, essentiellement constitués de matériel déplacé, sont datés par confrontation de la valeur moyenne d'inclinaison du site avec la courbe de variation séculaire de l'inclinaison. Lors de notre sélection, les courbes de référence de variation du CMT, qui avaient été utilisées pour la datation archéomagnétique, étaient celle établie au Laboratoire d'Archéométrie (UMR 153) pour la période gallo-romaine (fig. III-1), tracée "à la main" (Laubenheimer & Lanos, 1994), et les courbes de variation d'inclinaison et déclinaison de Thellier (1981, fig. I-29-a) et de Bucur, 1986 (fig. III-2), pour les lots plus jeunes.

La volonté constante d'amélioration de la fiabilité des courbes de variation séculaire, se traduisant par l'application de nouveaux modes de traitement statistique d'un jeu croissant de données, engendre une évolution de la connaissance du comportement du CMT dans le passé, avec

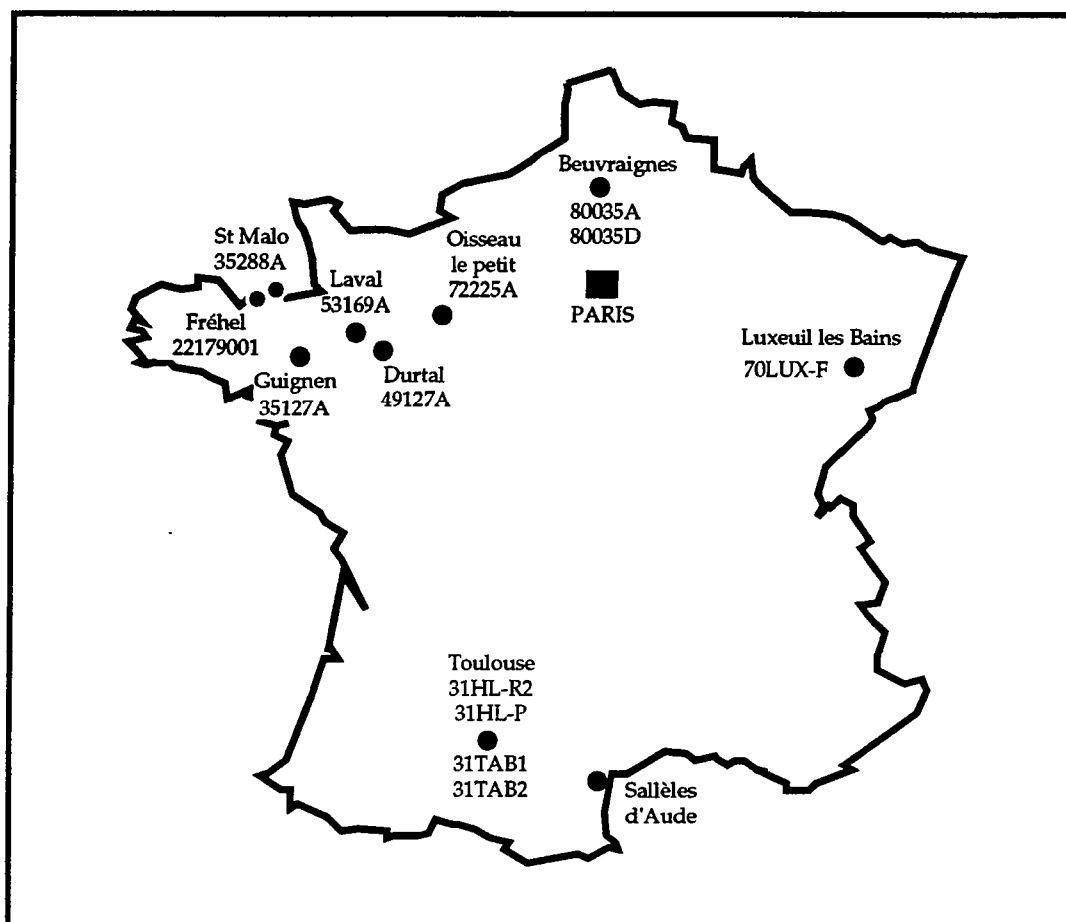


fig. III-4 : répartition géographique des sites d'où proviennent les lots étudiés. Les références sont indiquées en dessous des noms. L'emplacement du site de Sallèles-d'Aude, étudié au chapitre IV est aussi présenté.



de fréquentes remise en question des acquis antérieurs. Nous pouvons ainsi actuellement dénombrer trois types de courbes, comportant des différences de l'une à l'autre, dans la reconstitution de la variation séculaire de l'inclinaison :

- la première est celle publiée par I. Bucur en 1994 (fig. I-30a), qui regroupe les données de Thellier et celles acquises postérieurement par I. Bucur, traitées à l'aide de la méthode statistique bivariate développée par Le Goff (1990),
- la seconde est celle calculée au Laboratoire d'Archéométrie, qui concerne la période gallo-romaine (fig. III-5), et utilise un jeu de données différent de celui de Bucur (traitement mathématique selon la statistique de Mc Fadden)
- la troisième courbe a été calculée par nos soins (fig. III-3), à partir de l'ensemble du jeu de données utilisées dans les deux calculs précédents. Le traitement mathématique est de type spline cubique (cf. chapitre V). Le calcul de l'enveloppe d'erreur associée à la courbe spline moyenne est actuellement en cours de développement.

Alors que certaines études d'archéointensité étaient déjà réalisées nous avons ainsi cherché à redater les lots, ce qui n'a pas été sans désagréments.

N'ayant pas la possibilité de trancher entre une de ces courbes en particulier, nous avons choisi de les regrouper (fig. III-5).

La datation est effectuée par confrontation des données archéologiques, quand elles existent, avec les solutions archéomagnétiques. Il en résulte souvent une incertitude plus élevée sur l'âge attribué à chaque lot, mais celle-ci nous semble assez réaliste en l'état de notre connaissance de la variation séculaire de l'inclinaison.

## **Propositions de datation des lots utilisés pour la détermination de l'intensité**

Ces lots dont la localisation géographique est indiquée figure III-4, sont présentés en fonction du degré de fiabilité de la datation.

**Lot 22179A** : lot de tuiles provenant de la fouille d'un site d'habitat à Sable d'Or, près de Fréhel (48.42N, 2.19W), dans les Côtes du Nord (22). Le contexte archéologique de ce site est bien défini, puisqu'il semble que l'implantation se soit effectuée au plus tôt en 175 ap. J.C., et l'abandon à partir de 265 ap. J.C. (Langouët & al., 1980). L'étude archéomagnétique a fait ressortir des marques de perturbations magnétiques sur certaines briques (réchauffements postérieurs à la cuisson). L'inclinaison moyenne calculée à partir des échantillons non perturbés est de  $I = 67 \pm 1^\circ$ , soit  $67.5^\circ \pm 1^\circ$  à Paris (Goulpeau & Langouët, 1980, l'inclinaison de  $67^\circ$  tient compte de la correction d'anisotropie d'ATR, calculée après 1980). Nous remarquerons que cette valeur élevée, et la forte variation de l'inclinaison durant le troisième siècle qu'elle implique, est uniquement présente dans la courbe du

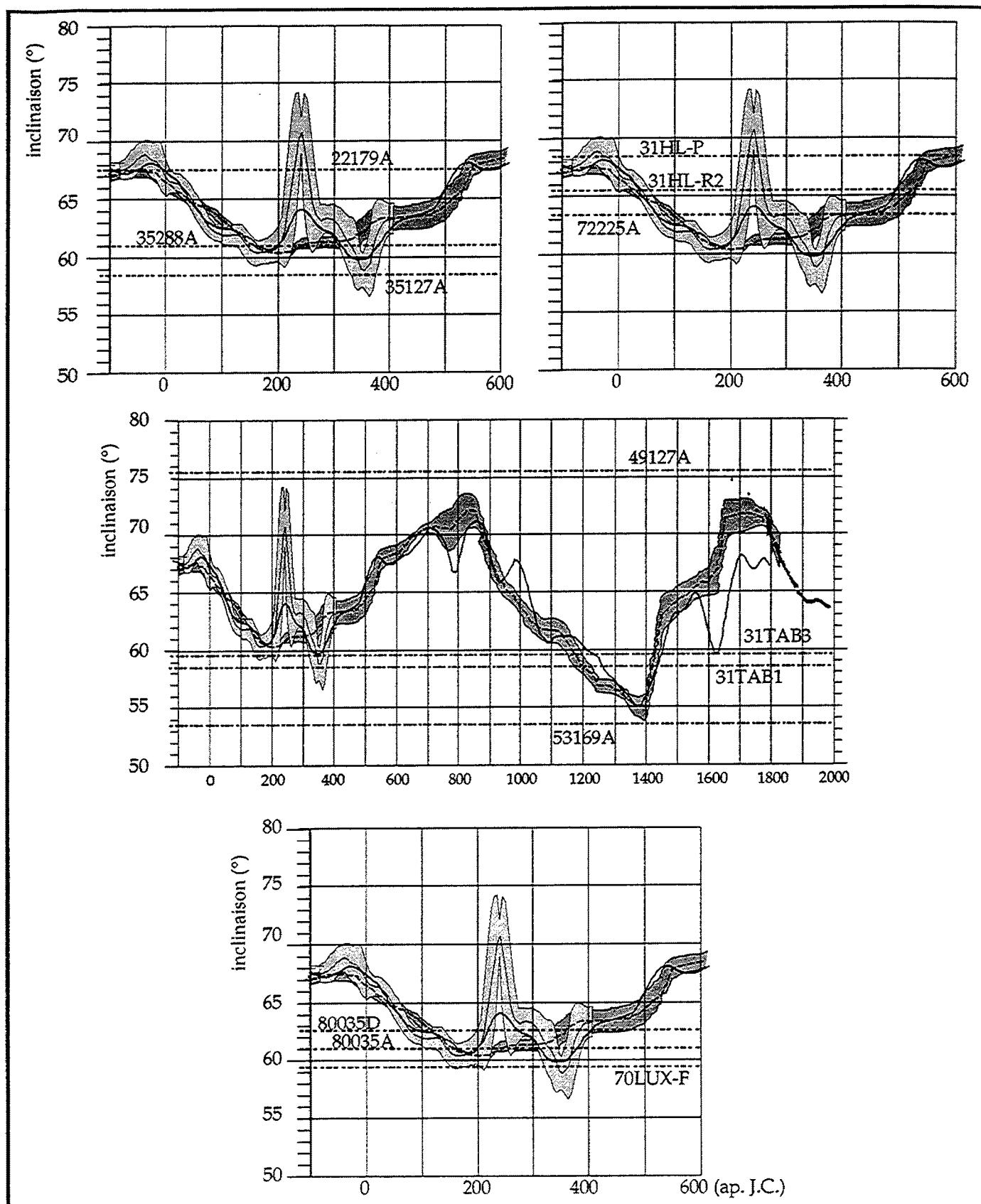


fig. III-5 : regroupement des différentes courbes de variation de l'inclinaison.

- trait fin avec une bande en gris clair : courbe de variation de l'inclinaison durant la période gallo-romaine, proposée par le Laboratoire d'Archéométrie (UMR 153), in Lanos 1990.
  - trait en pointillé avec bande gris-sombre : courbe de variation de l'inclinaison selon Bucur (1994).
  - trait épais continu : traitement en spline cubique de l'ensemble des données des deux références précédentes (cf. chapitre V). Le calcul de l'enveloppe d'erreur associée à la courbe spline moyenne est actuellement en cours de développement.
  - en trait fin et pointillés sont reportées les valeurs d'inclinaison moyenne calculées pour chaque lot.
- L'intersection de ces droites avec les courbes donne les solutions potentielles de datation archéomagnétique. La décision finale est prise en fonction du contexte archéologique (voir texte).

Laboratoire de Rennes (fig. III-5). Bien que cette valeur soit incompatible avec la courbe présentée par Bucur (1994), il semble qu'une solution 210-270 ap. J.C. serait plus appropriée par rapport à la disposition des autres valeurs d'inclinaisons présentes en 200 ou en 280 ap. J.C. C'est cette solution que nous retiendrons.

**Lot 35288A** : étude de fragments de *tegulae* provenant de la fouille du *castellum* d'Alet, près de St Malo (48.39N, 2.01W) en Ille et Vilaine (35). Un fragment de bol d'Argonne dont le décor à la molette est daté entre 360 et 420 ap. J.C. a été retrouvé dans une couche plus profonde (couche 10) à celle qui contient ces tuiles (couche 8). La couche 6, plus proche de la surface, et donc postérieure, est caractérisée par du mobilier carolingien. La couche 8 s'est donc mise en place entre 360 et 750 (Langouët 1983).

Après étude archéomagnétique deux lots ont été séparés. Un montre des réaimantations consécutives à un incendie, dont les traces ont été retrouvées durant la fouille, et l'autre ne porte pas de telles perturbations. Le traitement statistique de ce second lot donne une inclinaison  $I = 61.0 \pm 1.5^\circ$ , valeur identique à Paris puisque la différence de latitude est quasi nulle (Goulpeau & Langouët, 1983, l'inclinaison est ici calculée après correction d'anisotropie d'ATR). En regard à la disposition des valeurs d'inclinaison répertoriées dans cette période (toutes références confondues, fig. III-5), et aux limites d'âges fixées pour le lot 35288A, seule une solution fin du quatrième siècle est compatible pour une inclinaison moyenne de  $61^\circ$ . Nous retiendrons donc comme datation du lot la tranche d'âge 360-400 ap. J.C.

**Lot 35127A** : site "Le Biffoué" en Guignen (47.58N, 1.48W), Ille et Vilaine (35). Fouille d'un four de tuilier. Les pièces utilisées pour l'étude d'intensité proviennent de la partie interne du four (briques), qui sont caractérisées par une aimantation acquise lors d'une cuisson à plat, donc *in-situ*. L'inclinaison obtenue (après correction, postérieure, d'anisotropie d'ATR) est  $I = 57.5 \pm 1.0^\circ$ , soit  $58.5^\circ \pm 1.0^\circ$  à Paris (fig. III-5). Une étude par thermoluminescence (méthode DATE, Langouët & al., 1976 et 1979) a été effectuée sur trois briques de ce lot permettant de proposer une date de cuisson comprise entre 300 et 600 ap. J.-C. (Goulpeau & al., 1982).

La valeur d'inclinaison est compatible avec une solution fin second siècle à fin troisième siècle, mais incompatible avec les inclinaisons observées après la fin du quatrième siècle (cf. 35288A). Nous retiendrons donc pour ce site un âge compris entre 300 et 360 ap. J.C.

**Lot 53169A** : lot de tuiles plates provenant de l'abbaye de Clermont à Olivet près de Laval (48.04N, 0.46W), en Mayenne (53). L'étude archéomagnétique a révélé la présence d'échantillons à valeur d'ARN élevée, à risque d'effet de forme. Après correction de champ démagnétisant et correction d'anisotropie d'ATR, l'application de la statistique de Fisher permet d'obtenir une inclinaison de  $52.5 \pm 1.5^\circ$  au site, soit  $I = 53.5 \pm 1.5^\circ$  à Paris (rapport interne d'analyse, Goulpeau & al.,

1988). Cette valeur correspond à une solution unique par rapport à la disposition de toutes les valeurs d'inclinaison (fig. III-5), vers la fin du quatorzième siècle. La date de  $1370 \pm 30$  ap. J.-C. nous semble donc appropriée.

**Lot 49127A** : four de la Motte Grouillon. Ce four, à sole inclinée et tirage oblique, est situé près de Durtal (47.40N, 0.15W), en Maine et Loire (49). Les briques plates proviennent du démontage du petit mur séparant le foyer du laboratoire du four (voir en annexe le schéma d'un four). L'étude archéomagnétique révèle que toutes les briques ont connu leur dernière chauffe à plat, c'est à dire lors du dernier fonctionnement du four. Après correction de l'anisotropie d'ATR une valeur d'inclinaison  $I = 75 \pm 3^\circ$  est retenue au site (rapport interne d'analyse, Goulpeau & al., 1988)). Cette valeur, corrigée pour la latitude de Paris ( $I = 75.5 \pm 3^\circ$ ), permet de proposer pour la période moderne, la date unique de  $1700 \pm 50$  ap. J.-C. (fig. III-5). Nous rappelons qu'une mesure directe sommaire effectuée en 1671 a trouvée une inclinaison de  $74.8^\circ$ , valeur en accord avec celle estimée pour Durtal, et d'âge équivalent.

**Lots 31TAB1 et 31TAB3** : ces échantillons proviennent de la fouille du square Arnaud-Bernard, à Toulouse (43.36N, 1.26E) en Haute Garonne (31). Les archéologues ont daté le lot 31TAB1 de la seconde moitié du quatorzième siècle et le lot 31TAB3 du quinzième siècle. Après étude archéomagnétique la valeur de  $53.0 \pm 2.5^\circ$  au site,  $58.5 \pm 2.5^\circ$  à Paris, est retenue pour le lot 31TAB1. Le lot 31TAB3 fournit une inclinaison de  $54.0 \pm 2.0^\circ$ ,  $59.5 \pm 2^\circ$  à Paris après correction de latitude (rapport interne d'analyse, Goulpeau & Lanos, 1988, les valeurs présentées ici tenant compte de la correction d'anisotropie).

La valeur d'inclinaison de 31TAB1 est effectivement compatible avec une solution archéomagnétique de fin du quatorzième siècle, début quinzième siècle (fig. III-5). Nous retiendrons donc pour ce site une solution 1400-1470 ap. J.C.

La valeur d'inclinaison du lot 31TAB3 (fig. III-5), correspondrait plutôt à une datation présentant un léger décalage (en plus jeune) avec celle de 31TAB1 (comme proposé par les archéologues). 1420-1470 ap. J.C. semble être une datation raisonnable.

Les lots 31HL-R2 et 31HL-P ont été constitués lors des fouilles de l'hôpital Larrey à Toulouse (31) :

- le lot **31HL-R2** consiste en échantillons extraits de briques formant la base du mur d'enceinte gallo-romain, mur estimé du début de notre ère (période augustéenne) par les archéologues. La datation a été effectuée par étude archéomagnétique. Nous savons ainsi que toutes les briques ont été cuites debout. Après application de la statistique de Fisher, une inclinaison moyenne de  $64 \pm 2.5^\circ$ ,  $68.2 \pm 2.5^\circ$  à Paris, est calculée,

- les échantillons du lot **31HL-P** proviennent du démantèlement d'un puits gallo-romain. Les données de la fouille font penser que la construction du puits est légèrement postérieure à la

construction du mur d'enceinte. La valeur d'inclinaison moyenne est de  $61.0 \pm 2.0^\circ$  au site, soit  $65.5 \pm 2.0^\circ$  à Paris (rapport interne d'analyse, Goulpeau & Lanos, 1990, correction d'anisotropie appliquée).

Par confrontation avec les trois courbes et les valeurs connues d'inclinaison nous pouvons proposer une solution de datation dans l'intervalle -80 à 50 ap. J.-C. pour 31HL-R2 et nous retiendrons comme solution l'intervalle -20 à 60 ap. J.-C. pour 31HL-P (fig. III-5).

Lot 72225A : étude d'un *fanum* gallo-romain (*fanum* n° 5) situé à Oisseau-le-Petit, près d'Alençon (48.26N, 0.05E), département de la Sarthe (72). Les échantillons proviennent de *tegulae*. L'étude archéomagnétique fait ressortir une valeur moyenne d'ARN élevée (9.65 A/m) et le risque d'effets de champ démagnétisant (ou effet de forme, évoqué dans le chapitre I) dans les échantillons. La valeur d'inclinaison moyenne est obtenue après correction d'effet de champ démagnétisant :  $I = 63.5 \pm 1.5^\circ$ , au site et à Paris, l'écart de latitude étant quasi-nul (rapport interne d'analyse, Goulpeau & al., 1988, la correction d'anisotropie est ici effectuée). Pour la période gallo-romaine cette valeur permet de proposer la solution 50 à 100 ap. J.-C., fourchette compatible avec le contexte archéologique (fig. III-5).

Lot 70LUX-F : les échantillons utilisés pour la datation archéomagnétique du lot 70LUX-F (à Luxeuil-les-Bains (47.49N, 6.23E) dans la Haute Saône (70)) ont été prélevés sur un four gallo-romain après avoir été orientés *in-situ*. Les caractéristiques d'inclinaison et déclinaison ont été calculées après correction de l'anisotropie d'ATR. Les valeurs rapportées à la latitude de Paris sont  $I = 59.5 \pm 2.5^\circ$  et  $D = 0.9 \pm 4.1^\circ$  ( $I = 58.5 \pm 2.5^\circ$  au site, rapport interne d'analyse, Goulpeau & al., 1993). Durant la période gallo-romaine deux solutions peuvent correspondre à une telle inclinaison, en fin de second siècle et en milieu de quatrième siècle, cf. le lot 35127A, (fig. III-5). Du fait de la faible variation des valeurs de déclinaison durant la période gallo-romaine, les valeurs calculées pour ce lot ne permettent pas d'effectuer un choix. La solution est donnée par le contexte archéologique des sites de consommation de la céramique produite à Chatigny. Cette céramique commune y est trouvée uniquement dans un contexte fin de second siècle (Communication personnelle de C. Card, responsable de la fouille du site de Chatigny). La première proposition archéomagnétique est donc conservée comme datation de ce lot, en 150-220 ap. J.C.

Lots 80035A et 80035D. Ces échantillons (prélevés orientés *in-situ*) proviennent de fours localisés près de Beuvraignes, à proximité de la ville de Roye (49.42N, 2.48E), dans la Somme (80). La statistique de Fisher permet de calculer, après correction d'anisotropie, une inclinaison de  $I = 61.0 \pm 2.0^\circ$  à Paris,  $62^\circ$  au site, et une déclinaison  $D = -1.7 \pm 4^\circ$  pour le lot 80035A, et une inclinaison  $I = 62.5 \pm 2.5^\circ$  à Paris,  $63.5^\circ$  au site, ainsi qu'une déclinaison  $D = -4.8 \pm 5.4^\circ$  pour le lot 80035D (fig. III-5). Ce four 80035D a les mêmes caractéristiques magnétiques (inclinaison et déclinaison) qu'un autre four du site à l'intérieur duquel des poteries, datées entre 160 et 180 ap. J.-C., ainsi qu'un trésor monétaire,

daté 269 ap. J.-C., ont été retrouvés (rapport interne d'analyse, Goulpeau, Lanos, 1991).

Avant que nous ne remettions en question les courbes de variation, ces deux lots étaient datés  $195 \pm 15$  ap. J.-C. pour 80035D et  $305 \pm 15$  ap. J.-C. pour 80035A, trouvé stratigraphiquement postérieur au lot 80035D par les archéologues. C'est la raison pour laquelle nous les avons sélectionnés.

Cette configuration est évidemment compatible avec le contexte actuel de disposition des valeurs d'inclinaison dans le temps, mais elle n'est pas unique. En effet une solution à l'articulation troisième-quatrième siècle, serait aussi possible et s'accorderait avec le contexte archéologique. Les valeurs de déclinaison ont été déterminées mais, nous l'avons déjà dit, ne sont pas discriminantes pour la période gallo-romaine.

Nous ne pousserons pas cette réflexion plus loin, car ces deux lots ne nous ont pas permis de déterminer la valeur de l'archéointensité et ont finalement été abandonnés.

### **III-3 Caractéristiques des minéraux magnétiques : tableau III-1**

Ces études ont été effectuées afin d'avoir une meilleure connaissance et compréhension du comportement magnétique des échantillons.

Nous avons ainsi essayé de définir les caractéristiques suivantes :

- température de Curie des minéraux,
- spectre des températures de blocage,
- spectre de désaimantation par champ alternatif (CA),
- spectre d'acquisition d'aimantation rémanente isotherme (ARI),
- désaimantation thermique d'ARI croisées.

Nous avons aussi essayé de caractériser la taille des grains magnétiques par les expériences suivantes:

- cycles d'hystérésis,
- mesures de susceptibilité à froid,
- mesure d'ATR après refroidissement en champ nul dans l'azote liquide.

Tous les lots n'ont pas subi les mêmes tests : de l'observation des courbes de désaimantation par CA et d'acquisition d'ARI, on distingue un comportement homogène lié à la présence de 2 ou 3 composants minéralogiques, retrouvés de façon régulière dans les lots mais répartis dans des proportions différentes.

## Obtention des échantillons

La grande majorité des lots étudiés proviennent d'études archéomagnétiques anciennes (en direction uniquement) réalisées par le laboratoire d'Archéométrie de l'Université de Rennes I.

Seules les carottes ont été conservées et ce sont ces dernières qui ont été réemployées pour l'étude des caractéristiques magnétiques ainsi que l'étude de l'archéointensité des lots.

Les échantillons des lots 80035 (A et D) et 70LUX-F ont été obtenus à partir de carottages de blocs déjà prélevés et stockés au laboratoire d'Archéométrie.

## Repérage des échantillons

L'étude archéomagnétique du matériel déplacé utilise préférentiellement des objets de forme parallélépipédique comme matériel de base. Cette forme permet de retrouver quelle était la position de l'objet (à plat, de chant ou debout) lors de l'acquisition de son aimantation (cf. chapitre I).

Afin de déterminer cette position, le repérage des échantillons lors du carottage est effectué avec les conventions suivantes : axe x selon la longueur du parallélépipède, axe y selon la largeur et axe z selon l'épaisseur.

Pour les échantillons provenant de matériel orientés et prélevé *in situ*, il n'a pas été possible de recarotter dans le repère préétabli (plan horizontal-nord géographique) pour l'étude des directions du champ. Les blocs conservés au laboratoire étaient de trop petite dimension pour pouvoir choisir un axe de carottage incluant ces repères.

## Sélection des échantillons

Dans la mesure du possible, les critères suivants ont été appliqués pour la sélection des échantillons destinés à l'étude d'archéointensité (voir tableau III-9) :

- pas ou peu de viscosité,
- une seule composante d'aimantation (ce critère a été parfois reconsidéré),
- une intensité d'ARN comprise entre 1 A/m et 10 A/m (fig. III-6). Ces limites ont été choisies

parce que dans un lot précédemment étudié, Les Rairies (cf. chapitre II), les échantillons qui présentaient une ARN faible, inférieure à 1 A/m, ne nous ont jamais donné de bons résultats. Les échantillons d'aimantation supérieure à 10 A/m sont évités afin de parer tout problème d'effet de champ démagnétisant (Lanos, 1987b).

Les échantillons provenant de lots de matériel déplacé ont aussi été sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques de déviation et inclinaison magnétique. N'ont été utilisés que ceux présentant des directions similaires à la direction moyenne calculée sur le lot.

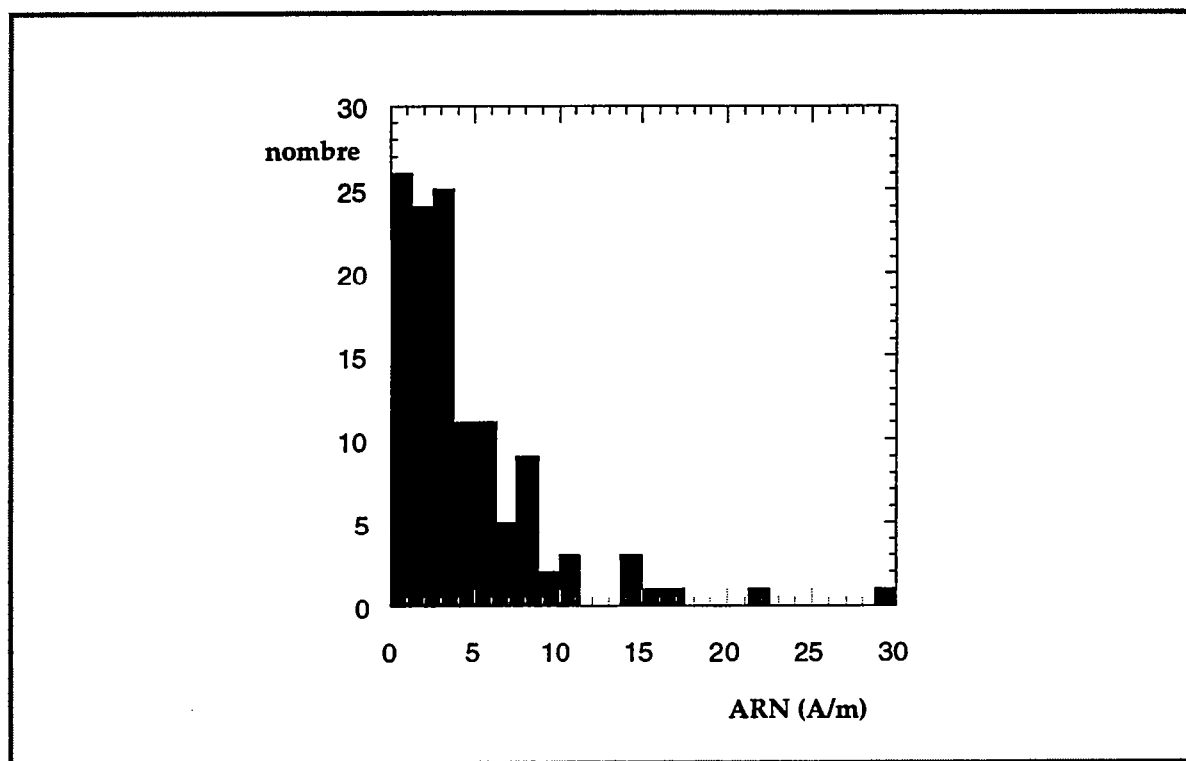


fig. III-6 : histogramme de l'ARN des échantillons utilisés pour la détermination de l'intensité. Les valeurs supérieures à 15 A/m proviennent de quatre échantillons de 80035D.



échantillon	ARN	$\chi(20^{\circ}\text{C})$	T <sup>°</sup> C	ARN/T :	ARN/CA :	ARI	ARI/T :	Jrs/Js	Hr/Hc
	A/m	10 <sup>-5</sup> SI	°C	(°C)	(mT)	(A/m),	(°C)		
				TDM ; Tt	MDF ; %d100	m0,2T ; m1,2T	TDM ; Tt		
<b>22179001</b>									
22179-49T	5.69	412		374 ; 550					
22179-73T	20.3	950			28.5 ; 21	238 ; 299	225 ; ≈550		
22179-98T	3.39	477			20.5 ; 6	50.5 ; 54.7	260 ; ≈550		
22179-110T	1.80			359 ; 580					
22179-141T	3.51	485			12.5 ; 3	30.5 ; 32.5	290 ; ≈550		
22179-142T	3.00	419						0.14	5.54
22179-149T	8.16	642		348 ; 550					
<b>31HL-P</b>									
31hlp-10B	0.66	70			60.5 ; 47				
31hlp-55B	0.55	119			41.5 ; 36				
31hlp-69B	1.00	68			33.5 ; 42				
<b>31HL-R2</b>									
31hrlr2-25B	0.60	97			82.0 ; 49	7.17 ; 13.2	215 ; ≈580		
31hrlr2-30B	0.85	107			69.0 ; 48	11.5 ; 17.7	230 ; ≈580		
31hrlr2-49B	0.49	204			* ; 50	8.7 ; 15.1	200 ; ≈580		
<b>31TAB1</b>									
31tab1-8B	2.98	1973			23.0 ;	36.6 ; 75.2	- ; 550		
31tab1-28B	1.43	1050			35.0 ;	13.3 ; 26.9	- ; 550		
31tab1-55B	1.11	580			* ;	11.8 ; 37.8	- ; 550		
31tab1-72B	3.95	216			25.0 ;	50.0 ; 70.8	- ; 550 ?		
<b>31TAB3</b>									
31tab3-4B	7.75	574			22.0 ;	157 ; 207	- ; ?		
31tab3-5B	0.83	1293			24.0 ;	32.1 ; 56.9	- ; 550		
31tab3-13B	0.60	605			31.0 ;	9.38 ; 17.53	- ; 500?		
31tab3-67B	0.13	65			25.0 ;	1.91 ; 3.47	- ;		
<b>35127A</b>									
35127-65B	3.29							0.053	4.67
35127-66B	5.13	2550			24.0 ;	121 ; 151	235 ; ≈550		
35127-69B								0.225	4.66
35127-149B	2.32	645		290 ; ≈550					
35127-179B	12.4	219		85 ; ≈550					
35127-226B	6.07	1045			19.0 ;	92.5 ; 130.5	195 ; ≈550		
35127-227B	3.26	887			32.0 ;	53.8 ; 91.5	180 ; ≈550		
35127-227B			550						
<b>35288A</b>									
35288-48T	0.23	103		375 ;					
35288-50T	8.53	351						0.35	3.33
35288-59T	0.44	136			17.5 ;	5.77 ; 8.97	180 ; <600?		
35288-64T	0.88	218		370 ; 580					
35288-70T	0.29	98.5			18.0 ;	3.72 ; 5.56	195 ; <600?		
35288-145T	0.66	138		315 ; 580					
35288-169T	4.44	519	550						
35288-180T	0.01	66			74.5 ;	1.58 ; 4.29	135 ; 550		
35288-183T	0.67	341			16.5 ;	9.36 ; 12.66	175 ; 550		
35288-191T	0.36	93		390 ; 580					
35288-198T	8.48	927	550						

échantillon	ARN	$\chi(20^\circ\text{C})$	$T^\circ\text{C}$	ARN/T :	ARN/CA :	ARI	ARI/T :	Jrs/Js	Hr/Hc
	A/m	$10^{-5}$ SI	$^\circ\text{C}$	( $^\circ\text{C}$ )	(mT)	(A/m),	( $^\circ\text{C}$ )		
				TDM ; Tt	MDF ; %d100	m0,2T ; m1,2T	TDM ; Tt		
<b>49127A</b>									
49127-61B	1.15	377			37.0 ;	50.1 ; 75.3	- ;		
49127-68B	9.25	866			63.0 ;	366 ; 486	- ;		
49127-69B	2.35	494			37.0 ;	79.1 ; 112	- ; 550		
49127-72B	9.74	997			20.0 ;	105 ; 110	- ;		
<b>53169A</b>									
53169-4S	2.59	222			41.0 ;	61.6 ; 73.6	- ; 550		
53169-54T	8.72	813			37.0 ;	203 ; 245	- ; 550		
53169-56T	5.14	722			20.0 ;	77.7 ; 102	- ; 500		
53169-64T	10.3	460			45.0 ;	228 ; 251	- ; 550		
<b>70LUX-F</b>									
70luxf-9P	6.36	484			45.0 ; 15	204 ; 225	375 ; 550		
70luxf-10P	6.02	370			* ; 60	31.7 ; 72.6	145 ; 600		
70luxf-12P	4.50	2032			21.5 ; 25	82.8 ; 136	175 ; 550		
70luxf-13P	13.3	3057				190 ; 349	185 ; 550		
70luxf-14P	15.1	2021			66.5 ; 46				
70luxf-15P	10.8	465			* ; 54				
70luxf-19P	5.62	1143			79.5 ; 47				
<b>72255A</b>									
72225a-10T	4.40	455			13.5 ; 15	48.9 ; 50.8	345 ; 600		
72225a-13T	15.9	2142			13.0 ; 14	194 ; 210	265 ; 600		
72225a-19T	3.40	1091			19.0 ; 29	50.2 ; 70.8	190 ; 600		
<b>80035A</b>									
80035a-3PA	4.08	372			60 ; 33				
80035a-16PA	2.92	188			60 ; 33				
<b>80035D</b>									
80035d-3P	17.9	1165	580						
80035d-3P									
80035d-6P	4.45	784	?		48 ; 18				
80035d-7P	1.21	162			* ; 55				
80035d-10P	11.84	1993							
80035d-12P	25.46	1263			58 ; 15				
80035d-13P	3.97	345			* ; 51				
80035d-14P	19.2	1727							
80035d-16P	13.07	1289	?						

Tableau III-1 : caractéristiques magnétiques des échantillons. échantillon, référence de l'échantillon, ARN, aimantation rémanente naturelle à 20°C,  $\chi(20^\circ\text{C})$ , susceptibilité mesurée en champ faible et à 20°C,  $T^\circ\text{C}$ , température de Curie, ARN/T, désaimantation thermique de l'ARN, TDM, température de désaimantation moyenne pour laquelle 50% de l'ARN est conservée, Tt, température de désaimantation totale, ARN/CA, désaimantation par champ alternatif de l'ARN, CDM, valeur du champ alternatif pour obtenir une désaimantation de 50% de l'ARN, \*, désaimantation insuffisante pour atteindre le CDM, %d100, pourcentage d'ARN persistante après application d'un champ alternatif de 100 mT, ARI, aimantation rémanente isotherme, m0.2T ou m1.2T, valeur de l'ARI après application d'un champ d'intensité 0.2 T ou 1.2 T, ARI/T, désaimantation thermique de l'ARI, TDM, température de désaimantation moyenne de l'ARI, Tt, température de désaimantation totale, Jrs/Js, rapport entre aimantation rémanente à saturation et aimantation induite à saturation, Hr/Hc rapport entre champ coercitif rémanent et champ coercitif voir fig. III-14-a).

## Viscosité des échantillons

Le test de viscosité (Thellier et Thellier, 1959) a été effectué en immobilisant l'échantillon, génératrice dirigée vers le nord magnétique. Au bout de 10 jours l'aimantation est mesurée. Puis l'échantillon est de nouveau immobilisé 10 jours, mais génératrice dirigée vers le sud magnétique, après rotation de 180° autour de l'axe y. L'écart entre les deux mesures permet de calculer les directions et l'intensité, exprimée en pourcentage de l'ARN, de l'aimantation portée par les grains à temps de relaxation petit.

La viscosité maximale observée sur les lots est de 8% avec une valeur moyenne de 3 à 4%. Ces valeurs sont donc faibles et les échantillons peuvent être considérés comme non visqueux.

### III-3-1 Minéralogie magnétique

#### Balances de Curie

Six échantillons (fig. III-7) parmi quatre sites ont été étudiés à l'aide de la balance de Curie. Les chauffes ont été réalisées à l'air car ces échantillons sont extraits de terres cuites qui sont à priori bien oxydées. Cet atmosphère a été choisi suite aux expériences évoquées au chapitre II. Le principal inconvénient en est la perte des éléments volatiles, perte qui se traduit sous la forme d'une perte de poids, et un décalage constant de la courbe de refroidissement par rapport à la courbe de chauffe.

échantillon	B	T <sub>M</sub>	T <sub>m</sub>	E <sub>t</sub>	T <sub>c</sub>	E <sub>50°C</sub>
	T	°C	°C	%	°C	%
80035D-3P	0.3				535	-1.3
80035D-6P	0.4				?	-14
80035D-16P	0.5				145 ?	-16
					540	
35288A-169T	0.2	150	75	-3.2	130	-5.7
		375	275	-2.4	545	
35288A-198T	0.1	175	75	0	150	-4
		325	275	0	550	
35127A-227B	0.5	200	100	-4	545	≈-5

Tableau III-2 : balances de Curie. échantillon, référence de l'échantillon, B, intensité du champ d'induction, T<sub>M</sub>, T<sub>m</sub>, températures maximale et minimale du test de stabilité, E<sub>t</sub>, évolution du moment magnétique entre le premier passage à la température T<sub>m</sub>, lors de la chauffe (J<sub>sc</sub>), et le second passage, lors du test (J<sub>st</sub>), E<sub>t</sub>=(J<sub>st</sub>-J<sub>sc</sub>)/J<sub>sc</sub>, T<sub>c</sub>, température de Curie. E<sub>50°C</sub>, évolution du moment magnétique pour une température de 50°C, avant la chauffe et après chauffe, E<sub>50°C</sub>=(J<sub>sr</sub>-J<sub>sc</sub>)/J<sub>sc</sub>.

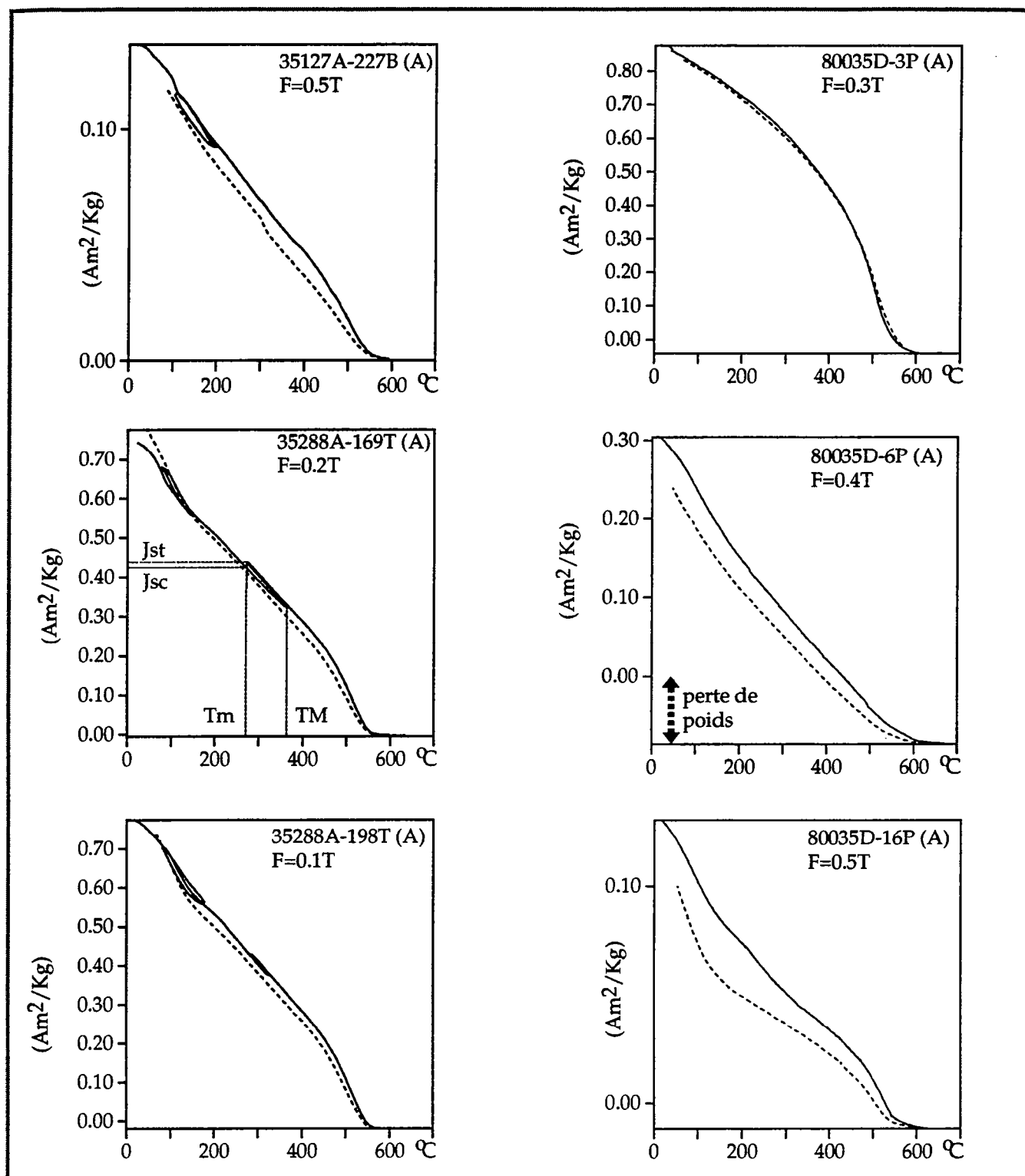


fig. III-7 : exemples de balances de Curie. Celles-ci ont été réalisées à l'air libre (A). La courbe de chauffe est en trait continu, la courbe de refroidissement en pointillés. L'intensité du champ appliqué est indiquée (F). Des tests de stabilité ont été incorporés dans la chauffe. TM, température maximale du test, Tm, température minimale, Jsc, valeur du moment magnétique à la température Tm, lors de la chauffe, Jst, valeur du moment magnétique pour la température Tm lors du test.

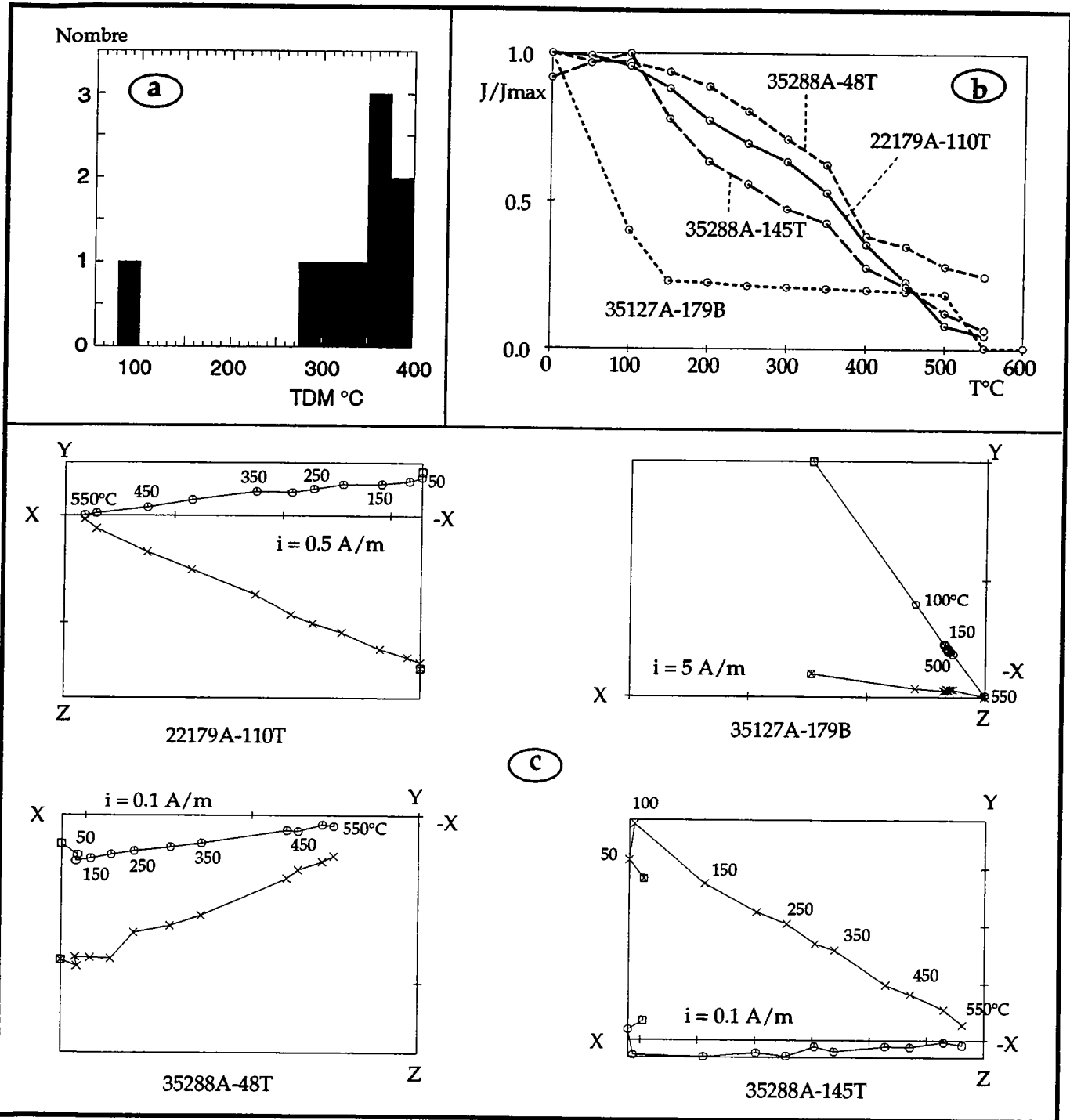


fig. III-8 : désaimantation thermique des ARN.

- a : histogramme des températures de désaimantation moyenne de l'ARN des échantillons à aimantation unique,
- b : courbes de désaimantation des échantillons les plus caractéristiques,
- c : diagrammes de Zijderveld de ces échantillons. L'échantillon 35127A-179B a un comportement original, avec une désaimantation rapide jusqu'à 150°C puis une désaimantation nulle jusqu'à 500°C. Ce phénomène est particulièrement visible dans le Zijderveld où les points sont regroupés entre 150 et 500°C. On remarque que l'échantillon 35288A-145T présente deux composantes d'aimantation, le site ayant probablement subi un incendie.

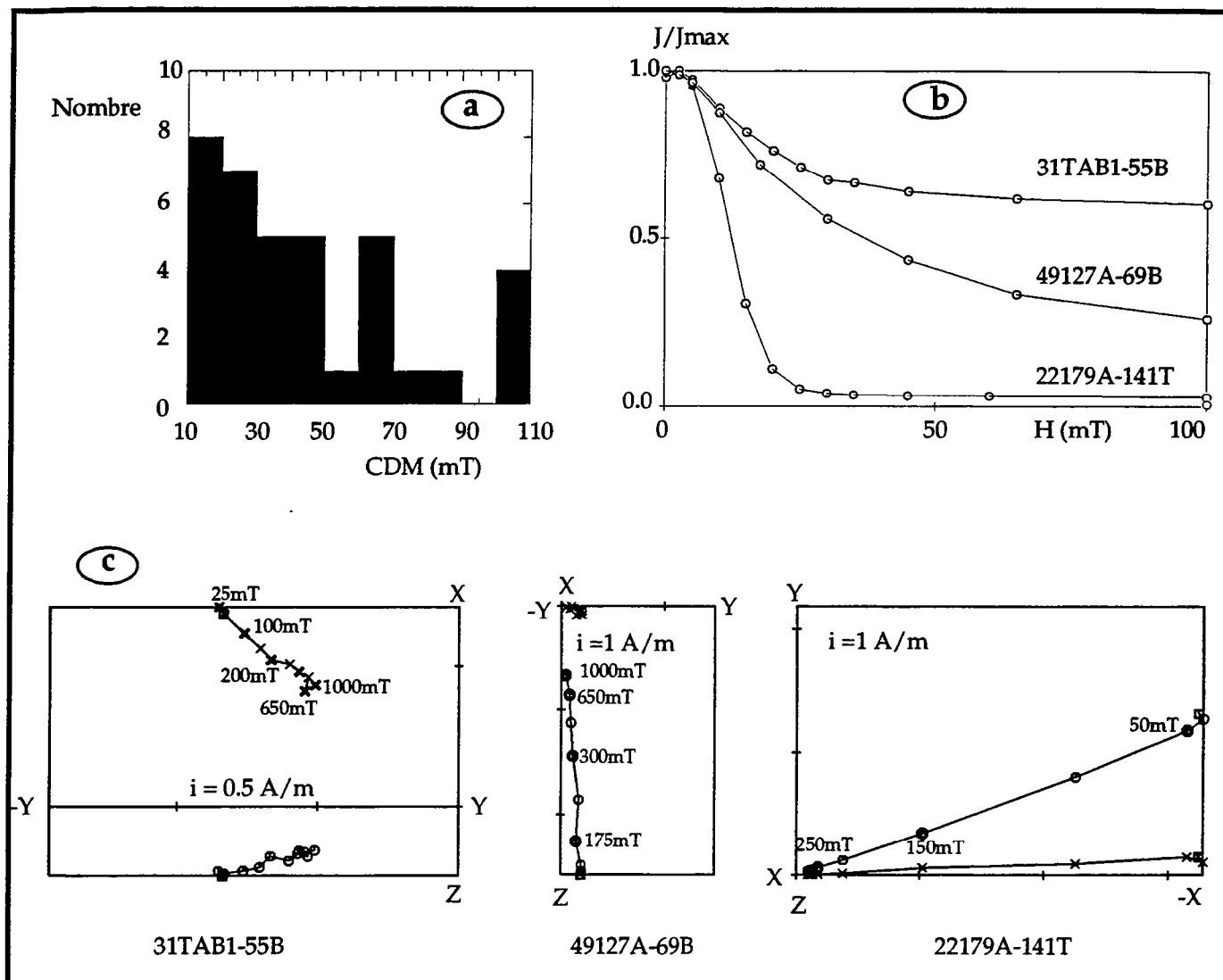


fig. III-9 : désaimantation par champ alternatif des ARN.

- a : histogramme des champs de désaimantation moyenne de l'ARN ,
- b : courbes de désaimantation des échantillons les plus caractéristiques,
- c : diagrammes de zijderveld de ces échantillons. Nous remarquons la résistance à la désaimantation de l'échantillon 31TAB1-55B. L'aimantation portée par l'échantillon 49127A-69B est en fait une ATR acquise lors des expériences de paléointensité, ce qui explique son alignement avec l'axe  $zz'$  de l'échantillon. Nous remarquons au passage l'effet de l'anisotropie d'ATR qui fait que la direction d'aimantation est légèrement décalée de l'axe  $z$ .

Le point de Curie est calculé en utilisant la méthode de Moskowitz (1981) : il est déterminé par la projection verticale du point d'intersection des tangentes au point d'inflexion de la courbe.

### **Commentaire des expériences $J_s/T$**

Les points de Curie de haute température sont habituellement attribués à la présence de magnétite, ou titanomagnétite à faible teneur en titane.

Les points de Curie de basse température, font penser à la présence de titanomagnétite à forte concentration en titane (Mankinen & al., 1985)

### **Désaimantation thermique de l'ARN (tableau III- 1)**

Neuf échantillons provenant des trois lots, 22179A, 35127A, 35288A, ont fait l'objet de désaimantation thermique d'ARN.

Deux échantillons, 35288A-145T (fig. III-8) et 35288A-64T, présentent des aimantations secondaires en basse température, entre 20°C et 200-250°C. Il est fort probable que cette aimantation soit une ATR, ce site ayant connu un incendie (voir présentation des sites).

L'histogramme des températures de désaimantation moyenne (TDM) des autres échantillons, présente des températures comprises entre 300 et 400°C, excepté pour l'échantillon 35127A-179B. Ce dernier est un cas particulier. La désaimantation est rapide jusqu'à 150°C, puis l'aimantation reste stable jusqu'à 500°C pour finalement se désaimanter à 550°C. Le Diagramme de Zijdeveld ne présentant qu'une composante d'aimantation, ce comportement est uniquement lié à la minéralogie. 35127A-149B, provenant du même lot, se comporte lui comme les autres échantillons, avec un TDM de 290°C. Aussi ce lot est conservé pour une étude d'archéointensité.

### **Désaimantation par champ alternatif de l'ARN**

Quarante sept échantillons (tableau III-1 et fig. III-9), provenant de 13 lots différents, ont été désaimantés par champ alternatif (CA). 38 échantillons à composante unique d'aimantation ont été retenus.

Les échantillons présentent trois types de comportement face à la désaimantation par CA :

- une résistance à la désaimantation, avec, après application d'un champ alternatif de 100mT, une aimantation persistante supérieure à 50% de la valeur d'origine (31TAB1-55B par exemple, comportement trouvés dans les lots 31HL-R2, 31HL-P). D'où la présence, dans l'histogramme des valeurs de champ de désaimantation moyenne (CDM, fig. II-9a), d'un pic artificiellement situé entre 100 et 110 mT qui regroupe ces échantillons.

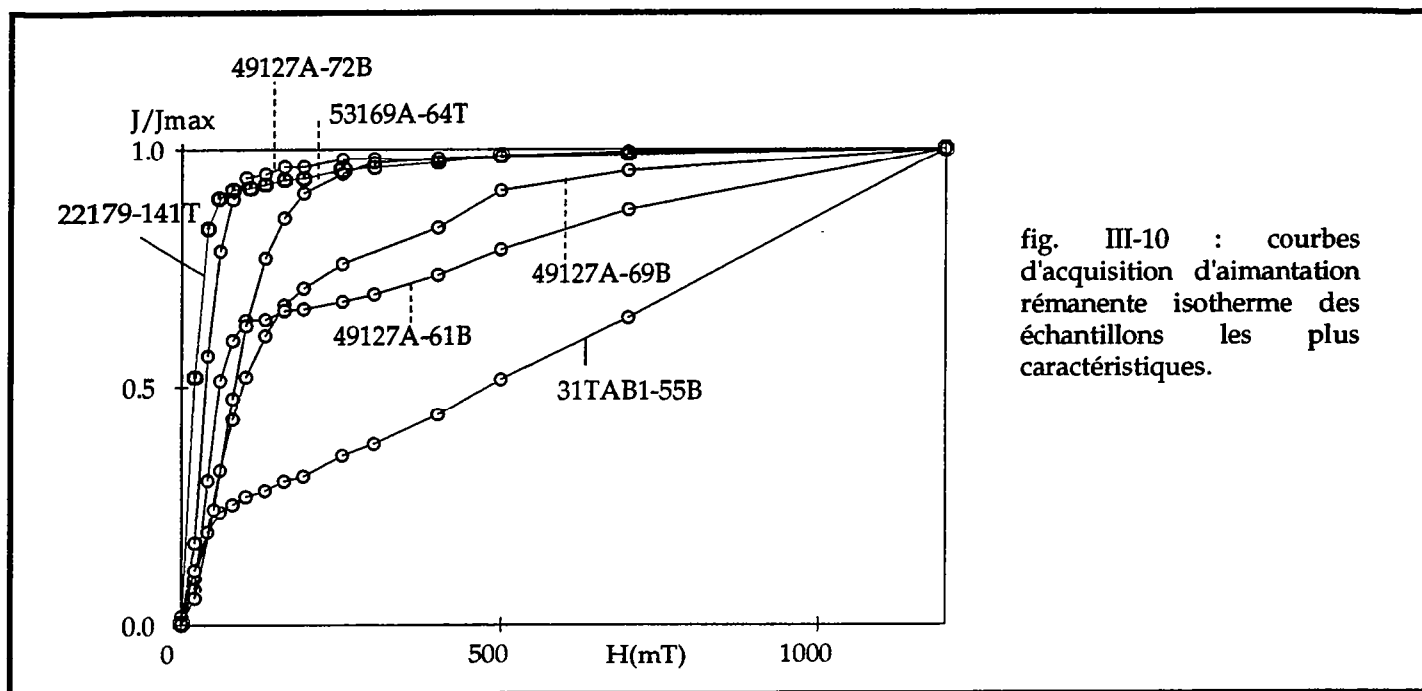


fig. III-10 : courbes d'acquisition d'aimantation rémanente isotherme des échantillons les plus caractéristiques.

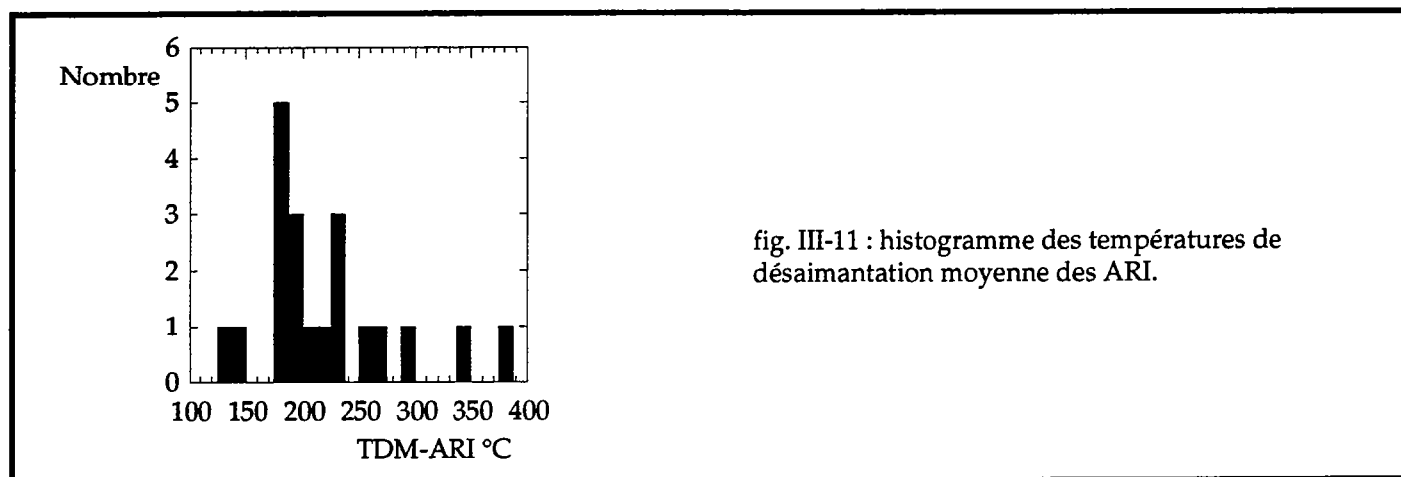


fig. III-11 : histogramme des températures de désaimantation moyenne des ARI.



- des désaimantations rapides, quasiment achevées pour de faibles valeurs de CA ( $\approx 25\text{mT}$ ), comportement retrouvé par exemple dans les lots 22179A, (voir 22179A-141T) et 72225A. Ce type est associé avec le groupement des valeurs entre 10 et 50 mT dans l'histogramme (fig. II-9b et c).

- un comportement intermédiaire au deux autres (fig. II-9b et c). Les échantillons se désaimantent progressivement avec l'augmentation du champ alternatif, sans toutefois que le champ soit suffisamment puissant pour désaimanter la totalité de l'aimantation (lots 35288A, 49127A, 49127A-69B par exemple, 53169A, 70LUX-F).

## **Acquisition d'aimantation rémanente isotherme**

Les courbes d'acquisition d'aimantation rémanente isotherme (ARI) ont été effectuées par acquisition progressive d'aimantation, le long de l'axe z de l'échantillon, jusqu'à atteindre un champ maximum de 1.2T (fig. III-10). Diverses figures sont observées :

- certains échantillons sont rapidement saturés, vers  $\approx 100\text{mT}$  (49127A-72B par exemple),
- d'autres, tel 31TAB1-55B, ont une aimantation qui évolue régulièrement avec l'augmentation de la valeur du champ d'induction, avec une progression quasi-linéaire, sans saturation.

- le reste des échantillons présentent un comportement intermédiaire aux deux premiers (49127A-69B par exemple), avec une progression rapide de l'intensité d'aimantation dans les faibles valeurs de champ (100-200 mT) suivi d'une progression continue, mais de croissance plus faible dans les hautes valeurs de champ.

Ces courbes suggèrent la coexistence de deux phases minérales, la première de champ coercitif faible, se saturant rapidement, à l'inverse de la seconde, de champ coercitif plus élevé (voir tableau III-1).

## **Désaimantation thermique des ARI**

20 échantillons, extraits de six lots, préalablement aimantés par acquisition d'ARI, ont été désaimantés thermiquement. La désaimantation est quasi totale pour des températures de l'ordre de  $550^\circ\text{C}$ . L'histogramme des TDM s'étale entre 120 et  $380^\circ\text{C}$  avec deux pics dont un centré sur  $180^\circ\text{C}$  et le second sur  $230^\circ\text{C}$  (fig. III-11). La distribution des températures de blocage comporte des valeurs assez faibles donc, comme constaté pour l'histogramme des TDM des ARN.

## **Acquisition et désaimantation thermique des ARI croisées**

Suivant les test décrits par Lowrie en 1990, et afin d'essayer d'associer champ coercitif et température de blocage de grains, des ARI ont été données selon deux axes de l'échantillon. La première est acquise selon l'axe z, dans un champ de 1.2T. La seconde est donnée selon l'axe x, dans

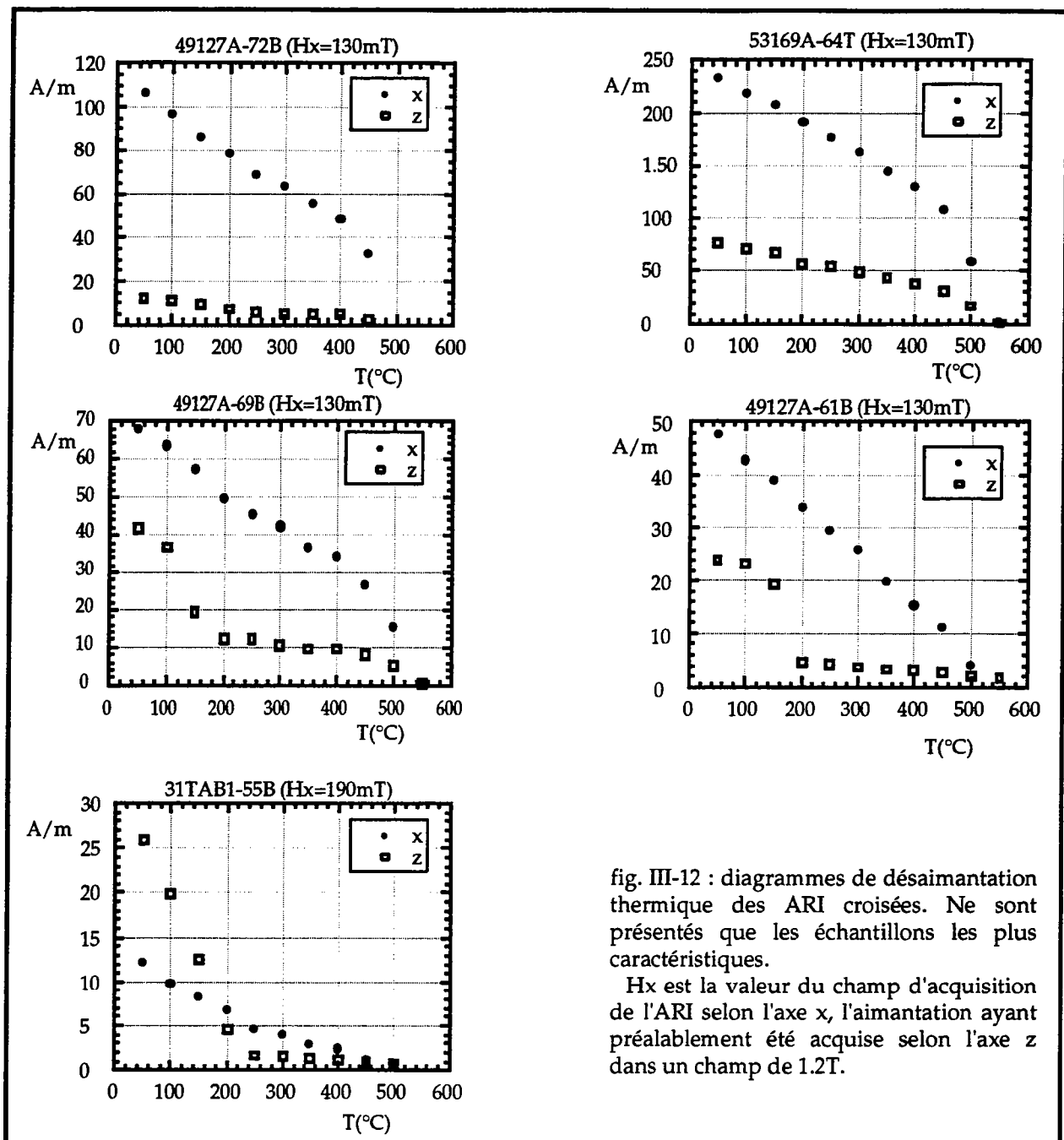


fig. III-12 : diagrammes de désaimantation thermique des ARI croisées. Ne sont présentés que les échantillons les plus caractéristiques.

Hx est la valeur du champ d'acquisition de l'ARI selon l'axe x, l'aimantation ayant préalablement été acquise selon l'axe z dans un champ de 1.2T.

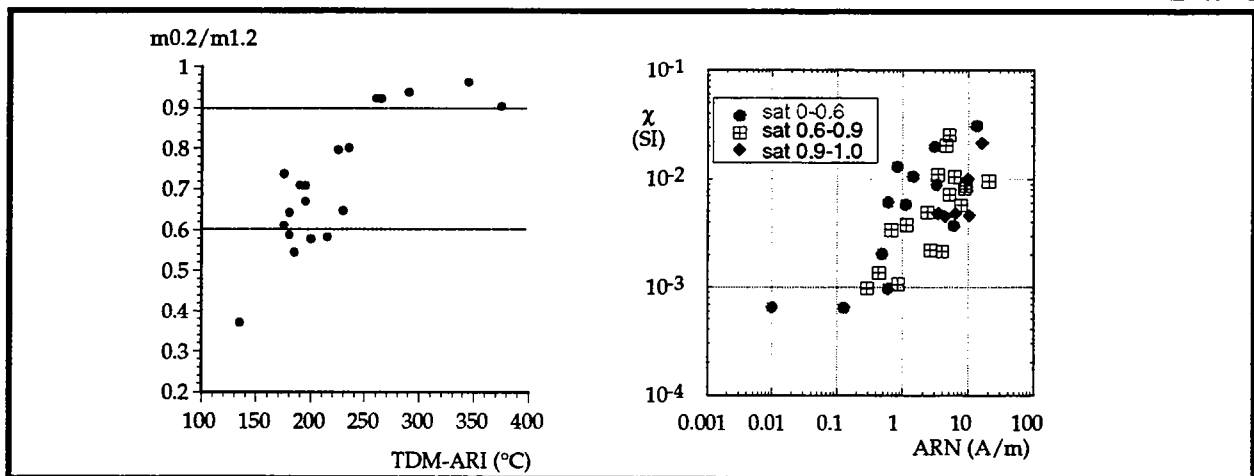


fig. III-13, a : relation entre les variations de rapport de l'aimantations d'ARI mesurée à 0.2 T sur l'aimantation d'ARI mesurée à 1.2 T (rapport de saturation), avec les températures de désaimantation moyenne de l'ARI. En pointillé, limites des classes de saturation.

- b : essai de mise en relation de la valeur d'ARN et de la valeur de susceptibilité, mesurée en champ faible et à température ambiante, en fonction de la classe de saturation à laquelle appartient l'échantillon.

un champ variant de 0.13 à 0.2T, la valeur du champ étant choisie en fonction des courbes d'acquisition d'ARI. Ces expériences ont été menées sur 16 échantillons (quatre par lot) des lots 31TAB1, 31TAB3, 49127A et 53169A.

La désaimantation thermique des ARI permet de dégager au moins deux types de composants à caractéristiques de champ coercitif et températures de blocage différentes, figure III-12 :

- les températures de blocage supérieures à 500°C retrouvées sur les aimantations dirigées selon les axes x ou z, amènent à penser que ce composant a toutes les caractéristiques ( $T_c$  et  $H_c$ ) de la magnétite ou titanomagnétite de faible teneur en titane,

- l'identification de l'autre minéral magnétique est plus difficile. Les températures de blocage sont faibles ( $\approx 250^\circ\text{C}$ ) et font penser à des titanohématites à concentration élevée en titane ( $0.7 < x_{Ti} < 0.8$ ). Mais de telles titanohématites ont des champs coercitifs très faibles (Stacey & Banerjee, 1974), ce qui n'est pas le cas ici puisque l'aimantation est difficile à saturer dans des champs inférieurs à 1.2T (voir la courbe d'acquisition d'ARI de 31TAB1-55B). Nous n'avons pas encore de solution définitive.

Le rapport entre ces deux composants peut être rendu par le taux de saturation  $m_{0.2}/m_{1.2}$ , rapport des moments d'ARI après application d'un champ de 0.2T, et le moment d'ARI après application d'un champ de 1.2T. Si la magnétite est dominante, la saturation est rapide et le rapport est proche de 1. Dans le cas inverse le rapport est proche de 0.

Après divers essais, une relation linéaire entre taux de saturation  $m_{0.2}/m_{1.2}$  et la TDM de l'ARI est mise en évidence (fig. III-13-a). Cette relation est logique, dans la mesure où un échantillon riche en magnétite (pour simplifier) se désaimantera surtout en haute température, et verra son aimantation se saturer rapidement, à l'inverse d'un échantillon surtout constitué du deuxième composant.

Nous avons essayé d'établir une relation entre le rapport de saturation et d'autres caractéristiques magnétiques des échantillons, comme l'ARN ou la susceptibilité magnétique mesurée à température de pièce et en champ faible.

A partir des rapports  $m_{0.2}/m_{1.2}$ , trois classes de saturation ont été établies : 0-0.6, 0.6-0.9, 0.9-1.0. Chaque couple de valeur ARN-susceptibilité en champ faible a été repéré en fonction de la classe de rapport de saturation correspondant. Il n'existe à priori aucun lien direct entre les valeurs de rapport de saturation et les couples de valeurs d'ARN et susceptibilité (fig. III-13-b). Les trois classes précédentes se répartissent de façon homogène entre les valeurs maxima et minima du diagramme ARN- $\chi$ . On remarque toutefois que les rapports 0.9-1.0 de saturation correspondent plutôt aux valeurs élevées d'ARN et susceptibilités. De par la nature même de leur minéralogie, il est logique que les échantillons qui contiennent majoritairement des (titano)magnétites (pauvres en titane), seaturent

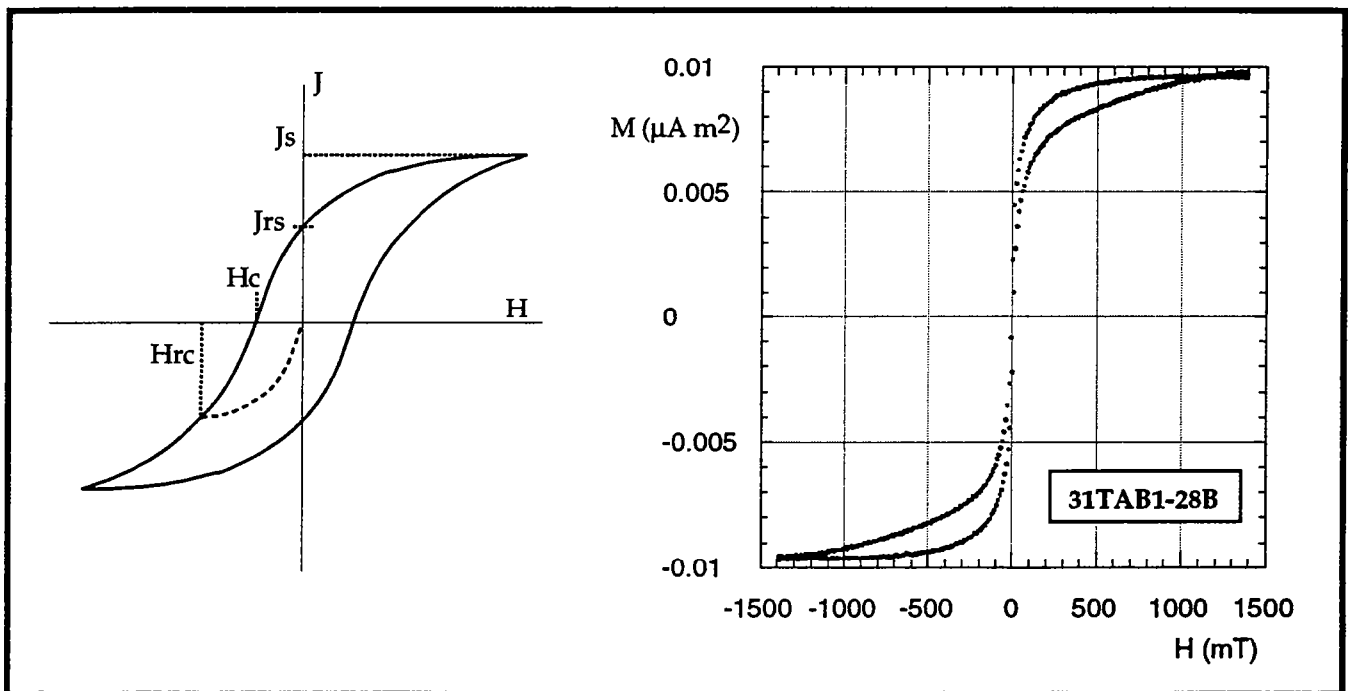


fig. III-14: cycles d'hystérésis.

- a : courbe d'hystérésis théorique montrant les différents termes utilisés.  $J_s$ , aimantation à saturation,  $J_{rs}$ , aimantation rémanente suite à la saturation,  $H_c$ , champ coercitif qui permet de réduire l'aimantation à zéro,  $H_{rc}$ , champ rémanent coercitif, qui, appliqué en direction inverse à  $J_{rs}$ , réduit l'aimantation à zéro.
- b courbe d'hystérésis de l'échantillon 31TAB1-28B.

rapidement et aient tendance à avoir une forte aimantation.

La disposition grossièrement allongée du diagramme ARN-susceptibilité (accentuée par l'utilisation d'une échelle log-log) traduit en fait la variation de la concentration de minéraux magnétiques dans chaque échantillons, et ce quelle que soit leur nature. Ainsi si un échantillon à une faible concentration en minéraux magnétiques, son aimantation et sa susceptibilité seront faibles, et ce sera l'inverse si l'échantillon est riche en minéraux magnétiques.

## Analyse chimique

Une analyse par fluorescence X des éléments majeurs a été effectuée pour quatre échantillons, 49127A-61B, 70LUX-F-10P, 31TAB1-28B et 31TAB1-55B (laboratoire de Spectrométrie de Fluorescence X de Rennes I). 70LUX-F-10P et 31TAB1-28B ont des courbes d'acquisition d'ARI intermédiaires à celles de 31tab1-55B et 49127A-61B (fig. III-10).

Cette analyse concerne l'ensemble de l'échantillon et non seulement les grains magnétiques. Nous pouvons noter toutefois que les concentrations en oxydes de fer varient entre 5 et 8% et celles d'oxydes de titane autour du pour-cent. Nous remarquons les résultats similaires des échantillons de la série 31TAB1 qui traduisent l'homogénéité chimique des argiles cuites (tableau III-3).

échantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.	Total
49127A-61B	65.41	22.00	7.38	0.00	0.72	0.48	0.00	2.42	1.15	0.07	0.24	99.87
70LUX-F-10P	58.31	22.38	7.85	0.05	2.97	0.15	0.06	6.54	0.89	0.13	0.34	99.67
31TAB1-28B	69.44	15.88	5.53	0.10	1.61	1.63	0.94	3.12	0.84	0.19	0.46	99.73
31TAB1-55B	69.74	15.69	5.44	0.10	1.55	1.37	0.94	3.19	0.86	0.22	0.21	99.31

Tableau III-3 : analyse des éléments majeurs de quelques échantillons. échantillon, référence de l'échantillon, P.F., perte au feu.

### III-3-2 Cycles d'hystérésis et essai de caractérisation de la taille moyenne des grains

Afin de caractériser la taille des grains magnétiques des cycles d'hystérésis ont été effectuées.

Ces expériences permettent de calculer les rapport  $J_{rs}/J_s$  (aimantation rémanente à saturation sur aimantation induite à saturation,  $R_I$  selon Wasileski ,1973) et  $H_r/H_c$  ( $H_r$ , champ coercitif rémanent, et  $H_c$ , champ coercitif, fig. III-14-a).

Dans le cadre d'une minéralogie de type bien définie, magnétite, titanomagnétite, ces rapports peuvent être utilisés comme des indicateurs de la taille des grains (Dunlop 1981, Dunlop 1983).

Wasileski (1973) a défini les valeurs de  $R_H$  ( $H_r/H_c$ ) en fonction des domaines :

$1 < \text{monodomaines} < 2 < \text{pseudo-monodomaines} < 4 < \text{polydomaines} < 10 < \text{superparamagnétiques}$ .

Dunlop en 1983 définit les limites suivantes :

	Hc	$R_H = H_r/H_c$	$R_I = J_{rs}/J_s$
magnétite polydomaine	$H_c < 3 \text{ mT}$	$4 < R_H < 9$	$R_I < 0.04$
titanomagnétite polydomaine ( $x=0.6$ )	$H_c < 7 \text{ mT}$	$2.5 < R_H < 3$	$R_I < 0.13$
échantillons à dominante monodomaine	$7 < H_c < 10 \text{ mT}$ dans les diabases  $16 < H_c < 40$ pour les basaltes.	$1.6 < R_H < 3$ dans quasiment tous les cas	$0.08 < R_I < 0.18$ dans les diabases, $0.17 < R_I < 0.27$ dans les basaltes (en théorie $R_I > 0.5$ ).

Tableau III-4 : caractéristiques des cycles d'hystérésis pour quelque cas typiques de taille et nature de grains magnétiques.

### Caractéristiques d'hystérésis

Un cycle d'hystérésis a été effectué au Laboratoire de Géologie de l'Environnement de Marseille sur l'échantillon 31TAB1-28B (fig III-14-b) et trois autres ont été réalisés au laboratoire de St Maur (échantillons 22179A-142T, 35127A-69B, 35288A-50T).

Les caractéristiques sont résumées dans le tableau III-5. Les valeurs théoriques et pratiques présentées précédemment sont toutes calculées pour une composition unique en taille et en minéralogie, ce qui n'est pas notre cas puisque nos échantillons sont composites.

L'interprétation de nos valeurs est de fait difficile. Les couples de valeurs  $R_H$  et  $R_I$  ne s'accordent d'ailleurs pas pour définir un type de grain particulier. En effet les valeurs de  $R_H$  seraient caractéristiques de grains polydomaines pour Wasileski et Dunlop, alors que les valeurs de  $H_c$  et  $R_I$  seraient caractéristiques de grains monodomaines.

échantillon	Hc	Hr	$R_H$	$R_I$
	mT	mT		
31TAB1-28B	4.94			0.16
22179A-142T	9.7	53.8	5.55	0.141
35127A-69B	12.2	56.9	4.66	0.225
35288A-50T	24.2	80.7	3.33	0.350

Tableau III-5 : caractéristiques des cycles d'hystérésis effectués sur quelques échantillons. échantillon, référence de l'échantillon, Hc, valeur du champ coercitif, Hr, valeur du champ coercitif à appliquer pour réduire l'aimantation rémanente à zéro,  $R_H$ , rapport entre champ coercitif rémanent et champ coercitif,  $R_I$ , rapport des aimantations rémanente et à saturation.

Wasileski (1973) a fait une remarque très intéressante pour les échantillons présentant un mélange de grains à fort et faible champ coercitif. Les caractéristiques d'hystérésis du mélange sont les suivantes :

$$R_H(\text{mélange}) > R_H(\text{faible}) > R_H(\text{fort}) \text{ et,} \\ R_I(\text{mélange}) < R_I(\text{faible}) < R_I(\text{fort}) .$$

Le caractère composite de nos échantillons peut donc faire que nos résultats suivent cette relation. La probabilité de conclure en la présence de grains plutôt de type polydomaine est donc plus élevé.

Le cycle d'hystérésis de l'échantillon 31TAB1-28B, dont l'ARI n'est pas saturée à 1T, présente en son milieu un pincement. Cette figure dite en taille de guêpe n'est observée que pour les échantillons 22179A-142T et 35127A-69B.

Suivant les travaux de Wasileski (1973), Pick & Tauxe (1993,1994), Roberts & al. (1995), nous savons que diverses configurations peuvent être à l'origine de cette particularité, que nous pouvons résumer à la présence d'un minimum de deux phases combinées, de propriétés d'hystérésis contrastées dans l'échantillon :

- soit que nous soyons en présence d'une seule phase minérale avec des grains sous forme monodomaines + superparamagnétiques, ou monodomaines + multidomaines,
- soit qu'il s'agisse d'un échantillon à deux, voire plus, minéraux magnétiques de coercivité totalement différentes.

Nous savons que nos échantillons sont constitués d'une minéralogie magnétique avec au moins deux composants dont les valeurs de champ coercitif sont très différentes. Les écarts en champ coercitif est suffisant pour créer une telle figure de constriction du cycle d'hystérésis. Celle-ci d'ailleurs est similaire à celle présentée par Roberts & al., 1995, à propos d'une analyse d'un échantillon de terre cuite (échantillon BULG1371). Ce comportement est alors attribué au contraste des champs coercitifs de la magnétite (ou magnétite déficitaire en cation) et de la goethite.

Mais nous pouvons aussi envisager que nous sommes en présence de grains de différentes tailles : Pick et Tauxe présentent dans leur étude des caractéristiques des magnétites des verres de basaltes (1994), une approche théorique de l'effet d'addition de grains superparamagnétiques (SP) à des grains monodomaines. Au fur et à mesure de l'enrichissement en SP, le cycle d'hystérésis se redresse et le pincement est de plus en plus affirmé pour s'achever sur une figure similaire à celle de 31TAB1-28B mais saturée vers 0.3T à cause de la magnétite.

Les analyses par spectre Mössbauer des terres cuites, qu'il s'agisse de sols "brulés" ou d'échantillons extraits de céramiques, révèlent fréquemment la présence de particules superparamagnétiques (Bouchez & al., 1974, Kostikas & al., 1974, Janot & al., 1974, Hess & al., 1974,

Simopoulos & al., 1975, Longworth & Tite, 1977, Tominaga & al., 1978).

Les résultats obtenus lors des cycles d'hystérésis ne sont donc pas déterminants, si ce n'est qu'ils confirment la présence dans nos échantillons de grains de propriétés d'hystérésis contrastées. Ce contraste pourrait résulter aussi bien d'un mélange de grains de nature minéralogique différente que d'un mélange de grains de tailles différentes, peut-être répartis entre monodomaines et superparamagnétiques.

### Tests de traitement à froid de l'ARN

Des tests de mesure d'ATR avant et après refroidissement, à la température de l'azote liquide, et réchauffement en champ nul ont été menés sur deux échantillons (80035D-1P et 49127A-64B, tableau III-6). Ceux-ci présentent des températures de blocages élevées qui correspondent plutôt à une composition de type (titano)magnétite (à faible teneur en titane). L'échantillon 80035D-1P, utilisé pour la détermination de la paléointensité, présente une disposition en courbe concave des couples ARN-ATR dans le diagramme d'Arai (cf. annexe n°a). Les tests d'ATR partielle ne montrant pas d'évolution d'acquisition (cf. diagramme d'Arai de 80035D-10P qui est identique, fig. III-18-d), cette disposition fait penser à la présence de grains à comportement polydomaine (Levi, 1977).

Si tel est le cas l'immersion en azote liquide suivie d'un réchauffement à température de pièce en champ nul, devrait mettre en évidence une perte d'aimantation (Cui & al., 1995). Aucun de ces deux échantillons ne montrent pourtant de variation de leur ATR après refroidissement. Le composant que nous assimilons à de la magnétite, majoritairement présente dans ces échantillons, n'a donc pas de comportement polydomaine. L'explication du comportement de 80035D-1P est à chercher ailleurs.

échantillon	ATR avant	ATR après	$\chi$ avant	$\chi$ après
	A/m	A/m	$10^{-5}\text{SI}$	$10^{-5}\text{SI}$
80035D-1P	11.13	11.14	4422	4431
49127A-64B	8.801	8.782	1396	1405

tableau III-6 : valeurs d'ATR et de susceptibilité avant et après refroidissement de l'échantillon dans l'azote liquide

### Susceptibilité à basse température

Deux essais de mesure de variation de la susceptibilité, depuis les basses températures jusqu'à température ambiante, ont été menés sur 80035D-10P et 80035D-14P. Ces échantillons ont une configuration identique des points dans le diagramme d'Arai (fig. III-18-d).

La susceptibilité décroît vers les basses températures de 20 et 40% pour 80035D-14P et



80035D-10P. Ces courbes sont d'allure similaire à celles obtenues par Sennayake & Mc Elhinny (1981) dans leurs tests sur de la titanomagnétite synthétique ( $Ti = 0.3$ ), homogènes, majoritairement polydomaines, de température de Curie basse ( $55-220^{\circ}\text{C}$ ) et faible champ coercitif. Mais la variation est moins importante.

Plusieurs caractéristiques séparent en fait nos échantillons de ce dernier modèle. 80035D-10P et 14P présentent des températures de Curie situées au delà de  $530^{\circ}\text{C}$ , dernière étape de température de détermination de l'archéointensité (voir tableau III-1). 80035D-12P, de valeurs d'ARN et susceptibilité équivalente, présente une résistance à la désaimantation par champ alternatif avec un CDM élevé de 58 mT.

Yang & al. (1993a) ont aussi réalisé des mesures de variation de la susceptibilité en fonction de la température. Les résultats obtenus sur ces terres cuites chinoises sont identiques à ceux que nous venons de décrire. Ils sont interprétés comme issus de la présence de grains monodomaines et superparamagnétiques de magnétite.

### III-3-3 Conclusions

Paradoxalement à la diversité de provenance des échantillons, les analyses précédentes nous permettent de définir une composition minéralogique des échantillons essentiellement constituée d'un mélange, dans des proportions variables, de deux ou trois composants magnétiques.

Le premier, de champ coercitif faible et de température de blocage maximale, ou de Curie, de  $500-550^{\circ}\text{C}$ , correspond bien à la magnétite, ou titanomagnétite de faible teneur en titane, avec ou sans substitution de cations (Roberts et al., 1995).

Le second a pour caractéristiques un champ coercitif élevé (retrouvé en CA et ARI) et une température de blocage basse, de l'ordre de  $200-250^{\circ}\text{C}$ .

Mais nous avons quelques difficultés à mettre un nom sur ce minéral.

Certains échantillons n'étant pas saturés au delà de 1.2 T ce comportement pourrait être attribué à la goethite, qui se sature pour un champ élevé de 5 T, et a une température de Curie comprise entre  $60$  et  $120^{\circ}\text{C}$  (Roberts, 1995). Or nous avons trouvé un minéral de température de Curie vers  $140^{\circ}\text{C}$  lors des tests de balance.

Le problème en fait est que la goethite est un minéral instable lorsqu'il atteint des températures élevées, puisqu'il se déshydrate depuis  $50^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $250^{\circ}\text{C}$  au maximum, en créant de l'hématite. Or le minéral qui pourrait être identifié comme la goethite dans nos échantillons présente lui des caractéristiques de stabilité thermique. Ainsi la balance de Curie de 80035D-16P (fig. III-7), manifeste de façon évidente la présence de ce minéral lors de la chauffe mais aussi lors du refroidissement, alors qu'entre temps la température de  $600^{\circ}\text{C}$  a été atteinte.

Nous pouvons d'ailleurs remarquer que du fait de sa résistance à la saturation, la goethite doit être difficilement mise en évidence dans un test de balance de Curie, surtout si elle est mélangée à de la magnétite.

Par contre, Yang & al. (1993b), ont observés la présence d'un minéral de température de Curie estimée à environ 230°C dans des échantillons de terres cuites péruviennes (échantillon P43A01, fig 1-e). Un traitement par la méthode Moskowitz (1981) des courbes thermomagnétiques abaisserait la température estimée en dessous de 200°C, ce qui rapprocherait cet exemple de ceux que nous avons trouvés. Cette température de Curie est attribuée par ces auteurs à une titanomagnétite plus riche en titane que celle observée à une température de 550°C.

Chauvin (1989) présente des résultats et une interprétation identique pour des échantillons extraits de coulées volcaniques.

Il semblerait que ce soit là la solution la plus à même d'expliquer le comportement de la courbe de Curie.

Nous avons aussi évoqué la possibilité d'une minéralogie de type titano-hématite, bien qu'il semble que la forte concentration en titane susceptible de baisser suffisamment les températures de blocage, abaisse aussi la valeur du champ coercitif (Stacey & Banerjee, 1974).

Pour ce qui est de la taille des grains, nos échantillons sont composites et les gammes de valeurs de  $R_I$  et  $R_H$  des cycles d'hystérésis, prédéterminées uniquement pour des tailles uniques de grains de (titano)magnétite, ne sont pas d'une grande aide. Le fort contraste de coercivité suffirait à expliquer l'allure en taille de guêpe des cycles d'hystérésis, mais la présence de grains de petite taille, mélangés à des grains monodomaines, pourrait aussi être une hypothèse à ne pas négliger. Les courbes de variation de susceptibilité en fonction de la température, des deux échantillons testés, ne seraient pas incompatibles avec cette idée, ni l'abondante littérature des spectres Mössbauer des terres cuites.

### **III-4 Détermination des paléointensités**

#### **III-4-1 Choix de la méthode**

Nous avons expliqué dans le chapitre II, pourquoi nous préférons utiliser la méthode Thellier-Thellier (1959) pour déterminer l'archéointensité des terres cuites (processus identique d'acquisition d'aimantation, chauffés à paliers progressifs, et contrôle en suivi de l'évolution). Nos différentes expériences, afin de tester les conditions d'optimisation d'acquisition de résultats d'intensité à partir de terres cuites, nous ont permis de définir une procédure que nous allons suivre dans la suite de ce chapitre.

## Description du processus expérimental

Excepté les trois lots 22179A, 35127A et 35288A, qui ont été étudiés au laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur des Fossés, les déterminations ont été réalisées au laboratoire de Rennes.

La méthode utilisée est celle décrite par Thellier & Thellier en 1959. Ainsi le champ de laboratoire est actif durant les deux chauffés. A Rennes, les échantillons sont chauffés une heure et demie. Le refroidissement s'effectue en une heure et quinze minutes. Les échantillons utilisés à Saint-Maur ont été chauffés durant cinq heures environ, l'ensemble refroidissant dans la nuit (cf chapitre II). Suite aux tests de stabilité magnétique (Chapitre II-B), les chauffés sont réalisées à l'air.

Des supports permettent de placer les échantillons toujours au même emplacement à chaque étape. La répétitivité des conditions de chauffés (température, valeur de champ d'induction) est ainsi garantie. Le champ est inversé entre deux chauffés à la même température. La valeur de ce dernier a été fixée à 50  $\mu$ T pour nos expériences.

Le nombre d'échantillons utilisés par lot varie de 8 à 12.

## Choix des étapes de température

Afin d'éviter d'exposer les échantillons à de trop fréquentes séquences de chauffe, il a été décidé de réduire le nombre d'étapes de mesure (entre 6 et 9 étapes en fait, disposées entre 20°C et 600°C).

Pour s'affranchir de tout effet d'aimantation secondaire, la première étape de chauffe a été effectuée à 100°C, excepté pour les échantillons utilisés à Saint-Maur, où suite à la présence d'échantillons à aimantation multicomposante du lot 35288A, la première étape a été effectuée à 200°C (afin d'être sûr de travailler uniquement sur la composante primaire).

Les tests d'ATR partielle ont été répartis en moyenne toutes les 3 étapes. Des tests-retour de la sixième à la première étape ont aussi souvent été intégrés.

## Calcul de l'anisotropie d'ATR (tableau III-7)

L'anisotropie d'ATR joue donc un très grand rôle dans nos mesures. Ne pouvant pas réorienter nos échantillons à volonté, nous appliquons au laboratoire une correction passant par le calcul du tenseur d'anisotropie d'ATR pour chaque échantillon (Chapitre II-C), méthode équivalente à celle exposée par Veitch & al, 1984 .

Les mesures d'ATR selon les différents axes sont effectuées lorsque la majorité des

échantillons du lot ont perdu en moyenne 70% de leur ARN. Ces mesures à des températures intermédiaires (entre 350°C et 450°C), effectuées elles aussi grâce à la méthode de la double chauffe, sont préférées à des mesures effectuées à haute température, température qui pourrait engendrer une évolution minéralogique des grains magnétiques.

Les résultats sont présentés dans les tableaux III-7 et en annexe.

lot	rapport K1/K3 minimal	rapport K1/K3 maximal du lot	valeur moyenne par lots
31HL-R2	1.13	1.20	$1.17 \pm 0.02$
31HL-P	1.10	1.30	$1.18 \pm 0.04$
72225A	1.14	1.43	$1.22 \pm 0.06$
70LUX-F	1.18	1.59	$1.30 \pm 0.09$
22179A	1.18	1.40	$1.29 \pm 0.06$
35288A	1.24	1.44	$1.32 \pm 0.04$
53169A	1.22	1.32	$1.25 \pm 0.02$
31TAB1	1.09	1.35	$1.20 \pm 0.05$
31TAB3	1.15	1.35	$1.24 \pm 0.03$
49127A	1.21	1.70	$1.37 \pm 0.09$
80035D	1.09	1.23	$1.17 \pm 0.04$
80035A	1.06	1.22	$1.12 \pm 0.05$
35127A	1.09	1.09	$1.09 \pm 0.00$

Tableau III-7 : résumé des caractéristiques des rapports K1/K3 des tenseurs d'anisotropie d'ATR des divers lots. Rapports calculés entre les valeurs propres maximales (K1) et minimales (K3).

### Effet de la vitesse de refroidissement

Nous avons déjà évoqué l'effet de la vitesse de refroidissement dans l'acquisition de l'ATR dans le chapitre II-5.

Nous rappellerons simplement ici les principales caractéristiques de gain d'ATR en refroidissement lent pour chaque lot étudié (tableau III-8).

Du fait du refroidissement très lent du four de Saint-Maur (12h), les intensités calculées ne sont pas corrigées de cet effet.

Comme il est possible de le voir le gain moyen par lot est faible, entre 1.6 et 4.5%. Toutefois à l'échelle de l'échantillon ces variations peuvent atteindre jusqu'à 9% (31TAB1), ce qui est une valeur importante. Aussi la correction est-elle appliquée systématiquement au calcul de la paléointensité lorsque la valeur de gain est significative par rapport à l'évolution constatée au bouclage.

lot	gain minimal du lot	gain maximal du lot	moyenne des gains du lot (%)	température °C
31HL-R2	-0.8	4.4	$2.2 \pm 1.1$	450/500
31HL-P	-0.4	8.5	$2.8 \pm 2.1$	430/450
72225A	-0.9	5.7	$2.6 \pm 1.3$	450/500
70LUX-F	1.4	7.8	$3.9 \pm 1.4$	450/500
22179A	-	-	-	-
35127A	-	-	-	-
35288A	-	-	-	-
53169A	2.3	4.9	$3.6 \pm 0.6$	460/520
31TAB1	2.3	9.1	$4.5 \pm 1.3$	460/520
31TAB3	1.6	7.1	$4.3 \pm 1.2$	520
49127A	0.8	7.4	$4.0 \pm 1.0$	520
80035A	0.4	8.6	$3.8 \pm 2.4$	430/460
80035D	-1.5	4.0	$1.6 \pm 1.4$	430/450

Tableau III-8 : résumé des gains d'ATR entre refroidissement lent et rapide pour les différents lots.

### III-4-2 Résultats et commentaires

#### Analyse des résultats (tableau III-9)

Les résultats de paléointensité sont sélectionnés en fonction des critères suivants :

- l'ARN portée par les carottes doit être monocomposante,
- les points dans le diagramme ARN-ATR (valeurs normalisées par la valeur de l'ARN), dit diagramme d'Arai, doivent être alignés,
- les tests de Thellier, ou d'évolution relative (*f. II-5*), ne doivent pas montrer une évolution supérieure à 5%,
- au moins 45 % du spectre de désaimantation doit être utilisé pour calculer la pente de la droite,
- cinq points minimum doivent être inclus dans le segment de droite portant ces 50%,
- la mesure de la susceptibilité en champ faible ne doit pas montrer d'évolution particulière au fur et à mesure des chauffes.

Les études de paléointensité ont portées sur 13 lots représentant 125 échantillons. Seuls 95 résultats ont été conservés après application des critères précédents, soit un taux de "réussite" de 76%.

Suite à la disparité des résultats obtenus pour les sites 80035A et 80035D ces lots sont rejetés. Seuls sont finalement conservés 10 lots, soit 107 échantillons.

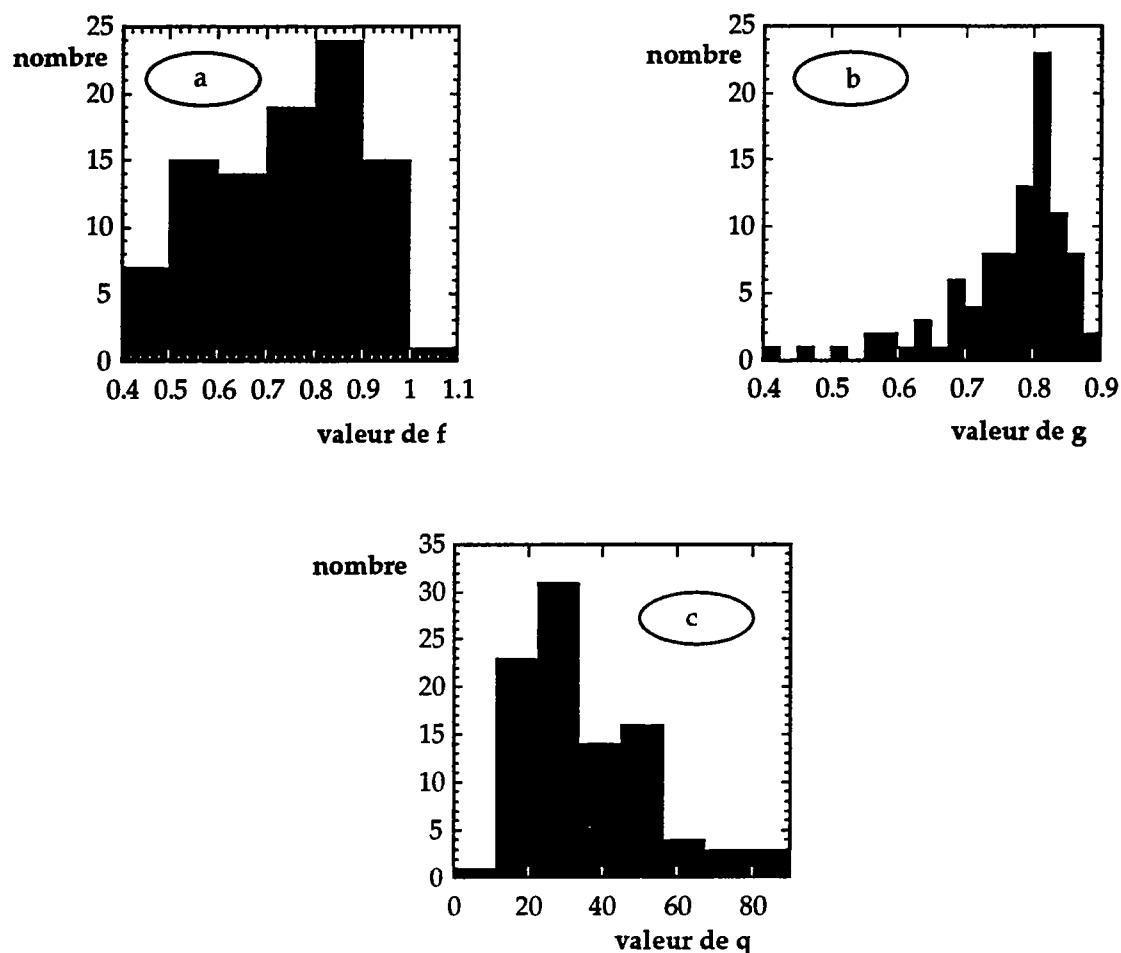


fig. III-15 : résumé des analyses statistiques des conditions de détermination de l'intensité (Coe & al., 1978, Prévot & al., 1985). Sont mis à l'écart les lots 80035A et 80035D.

- a : histogramme des valeurs de f, pourcentage d'ARN utilisée pour la détermination,
- b : histogramme des valeurs de g, facteur de distance entre les points (tend de 1 vers 0 quand l'espacement s'accroît),
- c : histogramme du facteur de qualité q.

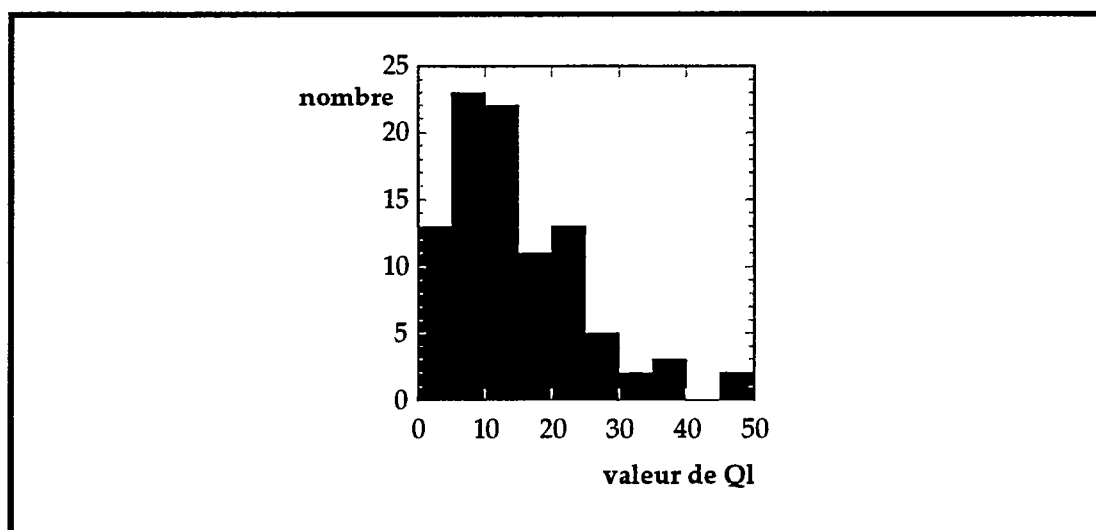


fig. III-16 : histogramme des valeurs de Ql, rapport de Koenigsberger au laboratoire (Prévot & al., 1985).

La pente de la droite est calculée par la méthode des moindres carrés. Les coefficients statistiques de Coe & al., (1978) et Prévot & al., (1985) sont utilisés afin d'attribuer divers degrés de qualité à nos déterminations.

Ces coefficients sont :

- f, portion d'ARN utilisée,
- g, variant de 1 à 0 selon la distance moyenne entre chaque point appartenant au segment f,
- q, facteur de qualité, dont la valeur varie en fonction des valeurs de f, g, s (incertitude relative sur l'estimation de la pente),  $q = fg/s$ , (Prévot & al., 1985).

Afin de pondérer chaque estimation en fonction de la qualité q calculée, le calcul de l'intensité moyenne du lot est effectué en utilisant les facteurs de pondération (w) des estimations individuelles définis par Prévot & al. (1985), lorsque le nombre de points définissant le segment de droite est faible (de 6 à 10 points dans nos expériences),  $w = fg/s$ .

L'histogramme des valeurs de f (fig. III-15-a) se répartit entre 0.4 et 1, avec une croissance régulière des classes vers un pic situé entre 0.9 et 0.95. L'histogramme des valeurs de g (fig. III-15-b) est nettement monomodal avec un pic centré sur 0.8-0.83.

L'histogramme du facteur de qualité (fig. III-15-c) est lui aussi monomodal, variant de 0 à 90 avec un pic centré sur 30. Une valeur de q égale à 40 est qualifiée de haute qualité par Coe & al (1978). Par contre une valeur de q de quelques unités est de très faible qualité. Prévot (1985) présente les estimations à valeur de  $q \geq 10$  comme étant bien définies. A la vue de l'histogramme nous pouvons donc qualifier nos estimations de bonne qualité.

Le rapport de Koenigsberger au laboratoire est un indicateur de la taille dominante des grains lorsqu'il s'agit de magnétite. Plus cette valeur est élevée et plus les grains sont fins. La limite entre grain polydomaine et monodomaine est fixée à 0.5 (Stacey, 1967). Bien que nous ne soyons pas fixés sur la minéralogie des échantillons, nous avons réalisé un histogramme des valeurs de QI. Celles-ci varient de 2 à 48 (fig. III-16). La composante majeure est située entre 4 et 6. Si nos grains étaient uniquement de type magnétite leur taille serait donc inférieure à la taille de grains polydomaines.

Afin de détecter une éventuelle relation entre les estimations de champ par échantillon, et la taille des grains (par le biais de QI, malgré les restrictions quant à la composition minéralogique), ou la nature des porteurs magnétiques (par le biais des TDM) les graphes QI-Fe et TDM-Fe ont été construits (fig. III-17-a et fig. III-17-b). Aucune relation n'est apparente dans ces tests.

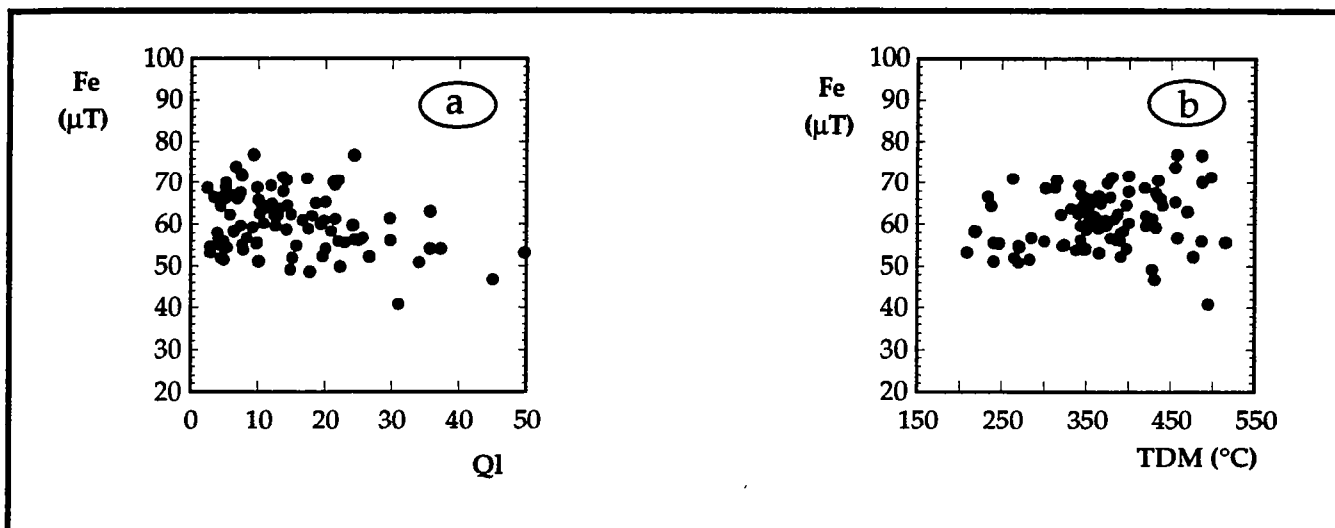


fig. III-17 : test de mise en relation de l'intensité estimée avec divers facteurs pouvant être liés à la minéralogie magnétiques.

- a : mise en relation intensité et facteur QI,
- b : mise en relation intensité et TDM.



échantillon	ARN A/m	$\chi$ 10 <sup>-5</sup> SI	Tmin °C	Tmax °C	n	f	g	q	ccl	QI	F ± $\sigma$ F $\mu$ T	Fm ± ic95 $\mu$ T	Fpo $\mu$ T	lat. °N	F Pa $\mu$ T	Ims °	IPa °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
31HL-R2 : -80 à 50 ap. J.C.																			
31HL-R2-11B	1.053	95	100	500	7	0.73	0.82	74.73	1.00	18.00	62.01 ± 2.47								
31HL-R2-26B	1.125	76	100	500	7	0.77	0.81	37.94	1.00	29.80	56.13 ± 4.65								
31HL-R2-37B	0.987	71	100	500	7	0.76	0.80	34.99	1.00	24.20	59.74 ± 5.22	60.2	61.5	43.36	64.9	64.0	68.2	9.99	10.20
31HL-R2-40B	1.203	355	100	450	6	0.58	0.78	82.91	1.00	5.15	66.17 ± 1.45	±				±			
31HL-R2-55B	1.005	82	100	500	7	0.79	0.82	28.96	1.00	24.50	56.36 ± 6.28	2.8				2.5			
31HL-R2-65B	1.088	82	100	500	7	0.69	0.81	32.20	1.00	20.10	65.32 ± 5.69								
31HL-R2-78B	0.925	96	100	450	7	0.66	0.78	23.59	1.00	17.50	59.00 ± 5.19								
31HL-R2-79B	3.233	251	100	450	6	0.53	0.78	19.88	1.00	25.60	56.72 ± 4.67								
31HL-P : -20 à 60 ap. J.C.																			
31HL-P-8B	0.854	67	20	530	9	0.92	0.83	73.47	1.00	21.50	61.19 ± 4.43								
31HL-P-18B	0.975	540	100	450	6	0.81	0.85	35.99	0.99	4.55	54.90 ± 4.20								
31HL-P-22B	0.819	69	20	530	8	0.92	0.77	74.63	1.00	19.80	60.93 ± 3.47	60.2	60.0	43.36	63.4	61.0	65.5	10.10	9.97
31HL-P-52B	0.917	92	20	530	9	0.92	0.85	48.02	0.99	16.60	60.99 ± 6.99	±				±			
31HL-P-59B	0.659	93	100	530	7	0.79	0.80	18.87	1.00	12.50	59.63 ± 9.99	2.0				2.0			
31HL-P-90B	1.077	554	100	450	6	0.55	0.82	26.39	1.00	3.98	57.85 ± 4.01								
31HL-P-92B	1.010	56	100	450	6	0.59	0.77	16.97	1.00	29.70	61.34 ± 6.57								
31HL-P-95B	1.337	111	100	450	6	0.57	0.69	15.76	1.00	18.60	65.02 ± 6.44								
72225A : 50-100 ap. J.C.																			
72225A-11T	7.677	1013	250	500	5	0.89	0.78	36.43	0.99	9.33	76.84 ± 4.41								
72225A-12T	8.411	1852	250	500	5	0.71	0.80	15.20	0.99	7.42	67.65 ± 7.64								
72225A-31T	4.071	893	100	500	7	0.93	0.83	21.71	0.99	9.17	59.26 ± 10.57	66.8	67.1	48.26	67.4	63.5	63.5	11.00	10.60
72225A-44T	7.840	2558	100	500	7	0.89	0.72	43.53	0.99	4.66	66.62 ± 4.88	±				±			
72225A-50T	14.39	2800	250	500	5	0.84	0.78	33.54	0.99	6.72	73.93 ± 4.34	4.3				1.5			
72225A-88T	5.655	1396	100	420	6	0.67	0.79	46.51	1.00	7.46	59.62 ± 2.71								
72225A-91T	4.122	1480	100	500	7	0.85	0.73	53.77	1.00	4.46	64.44 ± 3.74								
72225A-128T	8.544	2977	100	450	6	0.86	0.83	24.56	0.99	4.65	65.88 ± 7.71								
70LUX-F : 150-220 ap. J.C.																			
70LUX-F-2P	7.243	645	100	320	4	0.70	0.59	38.63	1.00	14.20	70.60 ± 1.51								
70LUX-F-5P	3.376	199	100	500	7	0.80	0.52	12.66	1.00	21.30	70.22 ± 12.66								
70LUX-F-9P	7.003	397	20	500	8	0.75	0.72	40.95	1.00		71.46 ± 5.60	70.0	70.1	47.49	70.8	58.5	59.5	12.20	11.10
70LUX-F-10P	6.502	370	20	500	8	0.92	0.69	45.05	1.00	22.00	70.57 ± 5.95	±				±			
70LUX-F-12P	4.807	2032	100	450	6	0.78	0.80	27.22	1.00	3.47	66.56 ± 6.10	2.3				2.5			
70LUX-F-13P	13.860	3057	100	500	7	0.88	0.81	46.82	1.00	6.44	66.95 ± 5.08								
70LUX-F-15P	10.650	465	100	500	7	0.88	0.65	35.59	1.00	24.40	76.69 ± 6.24								
70LUX-F-19P	5.547	1143	100	500	7	0.86	0.83	24.61	1.00	7.11	66.61 ± 9.70								

échantillon	ARN	$\chi$ 10 <sup>-5</sup> SI	Tmin °C	Tmax °C	n	f	g	q	ccl	QI	F ± σF μT	Fm ± ic95 μT	Fpo μT	lat. °N	F Pa μT	Ins °	IPa °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
22179A : 210-270 ap. J.C.																			
22179A-40T	1.512	272	200	450	6	0.80	0.73	28.51	0.99	10.80	60.28 ± 4.91								
22179A-52T	2.335	398	200	450	6	0.54	0.74	35.69	1.00	7.63	71.69 ± 3.19								
22179A-57T	1.470	326	200	450	6	0.62	0.80	31.08	0.99	7.03	67.10 ± 4.27								
22179A-77T	1.013	268	200	450	6	0.63	0.77	22.35	0.99	5.27	70.00 ± 6.13	68.1	68.3	48.42	68.5	67.0	67.5	10.70	10.80
22179A-78T	2.008	325	200	450	6	0.82	0.75	20.42	0.99	10.60	64.65 ± 7.78	±				±			
22179A-92T	5.933	545	20	450	6	0.81	0.70	14.20	0.99	13.70	71.41 ± 11.41	2.6				1.0			
22179A-106T	2.701	194	20	450	7	0.88	0.40	28.76	1.00	17.30	71.06 ± 4.36								
22179A-112T	1.588	300	280	450	4	0.71	0.72	32.19	1.00	7.55	72.15 ± 2.72								
22179A-127T	3.409	422	20	450	7	0.84	0.70	25.19	0.99	12.90	63.16 ± 7.33								
22179A-138T	3.321	101	20	450	7	0.72	0.57	18.17	0.99	21.50	69.52 ± 7.86								
35288A : 360-400 ap. J.C.																			
35288A-68T	5.316	541	200	450	6	0.44	0.80	16.24	0.99	13.70	67.98 ± 5.85								
35288A-93T	3.091	443	230	450	5	0.61	0.75	50.61	1.00	9.90	68.90 ± 1.86								
35288A-135T	1.534	345	200	450	6	0.90	0.76	56.61	1.00	6.95	66.14 ± 3.20	66.9	67.0	48.39	67.1	61.0	61.0	11.30	10.60
35288A-161T	6.164	947	200	450	6	0.63	0.79	32.49	1.00	10.10	65.89 ± 4.00	±				±			
35288A-169T	4.146	519	200	450	6	0.51	0.79	32.32	1.00	13.10	63.75 ± 3.22	1.5				1.5			
35288A-176T	5.061	705	200	450	6	0.58	0.80	15.63	0.99	11.50	64.24 ± 7.55								
35288A-198T	7.517	923	200	450	6	0.50	0.83	23.63	0.99	11.90	69.30 ± 4.80								
35288A-211T	7.112	1895	200	450	6	0.53	0.81	31.42	1.00	5.22	68.96 ± 3.82								
53169A : 1340-1400 ap. J.C.																			
53169A-12T	2.626	119	100	520	7	0.98	0.56	62.77	1.00	35.70	63.04 ± 2.72								
53169A-15T	5.378	508	100	460	8	0.85	0.86	55.52	0.99	19.30	60.05 ± 4.73								
53169A-19T	1.713	229	100	600	9	0.97	0.88	43.68	0.99	12.10	64.96 ± 8.88								
53169A-35T	14.740	1619	100	520	7	0.96	0.82	79.21	0.96	14.90	62.46 ± 3.10								
53169A-42T	3.720	507	100	600	9	0.97	0.89	32.01	0.99	12.90	62.03 ± 11.69	61.6	61.5	48.04	62.0	52.5	53.5	11.60	9.75
53169A-49T	6.221	1049	100	520	7	0.98	0.85	59.61	1.00	10.20	62.54 ± 4.34	±				±			
53169A-56T	4.837	722	100	520	7	0.96	0.83	47.33	0.99	12.60	59.66 ± 5.00	2.0				1.5			
53169A-11S	2.621	364	100	520	7	0.90	0.84	42.64	0.99	15.70	54.91 ± 4.90								
53169A-16S	4.543	493	100	600	9	1.02	0.82	27.85	1.00	14.30	64.55 ± 13.65								

échantillon	ARN	$\chi$ 10 <sup>-5</sup> SI	Tmin °C	Tmax °C	n	f	g	q	ccl	QI	F ± $\sigma$ F $\mu$ T	Fm ± ic95 $\mu$ T	Fpo $\mu$ T	lat. °N	F Pa $\mu$ T	Ins °	I Pa °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
31TAB1 : 1400-1470 ap. J.C.																			
31TAB1-3B	3.645	853	100	440	6	0.58	0.78	17.81	1.00	8.35	56.80 ± 5.83								
31TAB1-8B	3.253	1973	100	460	8	0.95	0.87	52.89	1.00	4.47	52.04 ± 4.87								
31TAB1-17B	2.767	251	100	520	7	0.85	0.80	31.80	1.00	20.90	58.31 ± 6.21								
31TAB1-20B	1.832	234	100	460	8	0.67	0.83	25.62	1.00	14.20	58.78 ± 7.70	55.7	55.4	43.36	58.5	53.0	58.5	10.30	9.20
31TAB1-32B	2.082	128	100	600	9	0.92	0.87	53.95	1.00	35.70	54.18 ± 5.66	±				±			
31TAB1-72B	3.999	216	100	440	5	0.51	0.66	9.85	1.00	37.30	54.17 ± 5.62	1.4				2.5			
31TAB1-80B	2.627	550	20	460	9	0.88	0.84	66.50	1.00	9.86	55.56 ± 4.33								
31TAB1-81B	1.559	169	20	520	8	0.89	0.85	47.88	1.00	20.10	54.15 ± 5.16								
31TAB1-87B	1.312	410	100	520	7	0.79	0.81	32.70	1.00	6.42	58.27 ± 5.65								
31TAB1-92B	1.257	344	20	520	8	0.92	0.81	47.50	1.00	7.64	55.10 ± 5.21								
31TAB3 : 1420-1470 ap. J.C.																			
31TAB3-9B	1.255	544	100	520	6	0.84	0.76	19.44	1.00	5.43	54.43 ± 7.18								
31TAB3-23B	0.493	206	100	520	6	0.76	0.74	34.34	1.00	4.99	55.99 ± 3.68								
31TAB3-34B	3.920	1166	100	440	5	0.71	0.75	45.63	1.00	7.84	53.94 ± 1.88								
31TAB3-40B	0.677	567	100	440	5	0.68	0.74	17.67	1.00	2.86	54.59 ± 4.67								
31TAB3-51B	2.917	232	20	440	6	0.76	0.77	26.96	1.00	25.00	56.24 ± 4.84	54.2	54.2	43.36	57.2	54.0	59.5	10.00	9.00
31TAB3-55B	0.854	215	100	520	7	0.76	0.82	38.28	1.00	10.10	51.11 ± 4.12	±				±			
31TAB3-57B	0.758	171	100	520	7	0.76	0.83	50.07	1.00	9.76	55.38 ± 3.52	1.1				2.0			
31TAB3-61B	8.437	377	20	520	7	0.98	0.78	44.31	1.00	49.70	53.19 ± 5.50								
31TAB3-65B	2.515	1342	100	440	6	0.77	0.83	21.64	1.00	4.91	51.56 ± 6.11								
31TAB3-67B	0.120	65	100	520	7	0.81	0.86	22.32	1.00	4.11	56.72 ± 8.91								
31TAB3-69B	0.758	612	100	440	6	0.66	0.77	23.78	1.00	2.94	53.25 ± 4.57								
49127A : 1650-1750 ap. J.C.																			
49127A-62B	2.277	234	240	520	5	0.67	0.64	46.35	1.00	22.00	55.95 ± 1.56								
49127A-63B	7.625	686	100	520	7	0.55	0.47	24.37	1.00	23.00	55.67 ± 2.95								
49127A-64B	10.870	1336	100	520	7	0.48	0.61	15.47	1.00	31.00	40.81 ± 3.89								
49127A-71B	10.960	997	100	520	7	0.80	0.58	31.73	1.00	26.70	52.24 ± 3.82	50.4	51.3	47.40	51.8	75.0	75.5	7.26	8.16
49127A-72B	2.959	535	100	440	6	0.50	0.65	29.60	1.00	14.80	49.10 ± 2.19	±				±			
49127A-73B	2.946	362	100	520	7	0.75	0.81	23.80	1.00	19.60	52.33 ± 6.66	2.5				5.0			
49127A-74B	3.159	237	100	520	7	0.58	0.71	13.41	1.00	34.10	50.87 ± 7.81								
49127A-75B	5.824	381	20	520	8	0.79	0.78	25.06	1.00	45.00	46.73 ± 6.85								
49127A-77B	5.085	575	20	440	7	0.62	0.77	45.07	1.00	22.30	49.85 ± 2.62								
49127A-78B	3.457	528	20	440	7	0.57	0.69	19.74	1.00	17.70	48.59 ± 4.81								
49127A-79B	4.811	751	20	440	7	0.48	0.68	16.75	1.00	15.10	51.88 ± 5.06								

échantillon	ARN	$\chi$ 10 <sup>-5</sup> SI	Tmin °C	Tmax °C	n	f	g	q	ccl	QI	F ± $\sigma$ F $\mu$ T	Fm ± ic95 $\mu$ T	Fpo $\mu$ T	lat. °N	F Pa $\mu$ T	Ims °	I Pa °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
35127A : 300-360 ap. J.C.																			
35127A-32B	5.724	852	200	450	6	0.49	0.78	24.65	1.00	10.80	63.73 ± 3.99	64.3	63.3	47.58	63.9	56.0	58.5	11.40	10.00
35127A-147B	2.849	1598	200	450	6	0.54	0.82	19.41	0.99	2.46	68.81 ± 6.32	±				±			
35127A-159B	9.197	2764	200	450	6	0.65	0.80	87.50	1.00	5.88	62.32 ± 1.48	3.1				1.0			
35127A-209B	3.238	426	200	450	6	0.46	0.78	32.61	1.00	12.30	62.22 ± 2.76								

tableau III-9 : résumé des caractéristiques de détermination de l'intensité. échantillon, ARN, aimantation rémanente de l'échantillon,  $\chi$ , susceptibilité mesurée en champ faible et à température de pièce, Tmin, température d'étape minimale et Tmax, température d'étape maximale utilisée, n, nombre d'étapes utilisées, f, fraction d'ARN utilisée, g, facteur de distance moyenne entre les points, q, facteur de qualité, ccl, coefficient de corrélation linéaire, QI, rapport de Koenigsberger au laboratoire, F +  $\delta$ F, estimation de l'intensité et son erreur standard, Fm ± ic95, intensité moyenne du lot et son intervalle de confiance à 95%, Fpo, intensité moyenne pondérée, lat., latitude du site, F Pa, intensité pondérée estimée à la latitude de Paris, Ims, inclinaison moyenne au site, I Pa, inclinaison moyenne à la latitude de Paris, VDM, moment dipolaire virtuel, VADM, moment dipolaire virtuel axial.

## Echantillons rejetés (voir fig. III-18 et annexe).

Quelques exemples d'échantillons rejetés sont présentés sur la figure III-18.

L'échantillon 22179-63T est rejeté du fait de la disposition des points dans le diagramme de Zijdeveld, lesquels ont tendance à se placer sur des courbes et non des droites (fig. III-18-a), comme si l'échantillon évoluait régulièrement. Pourtant le diagramme d'Araï ne présente pas d'évolution notable, et l'alignement des points ARN-ATR permet de calculer une intensité de  $63.36 \mu\text{T}$  légèrement plus faible que la moyenne estimée du lot :  $68.10 \mu\text{T}$ .

L'échantillon 35288A-82T est rejeté parce que son aimantation est multicomposante (fig. III-18-b).

Lot 35127A : la composition minéralogique de ce lot est particulièrement intéressante car il est net que certains échantillons (sept sur onze ici) ont une composition minéralogique avec une répartition des températures de blocage nettement séparées. Ces échantillons perdent entre 50 et 90% de l'ARN entre 20 et  $200^\circ\text{C}$  (fig. III-18-c), et ne réagissent plus aux chauffes successives suivantes, même lorsqu'une température de  $450^\circ\text{C}$  est atteinte. Cette aimantation est finalement annulée pour une température inférieure à  $600^\circ\text{C}$ . C'est un comportement que nous avons détecté lors des désaimantations thermiques d'ARN.

Les quatre autres échantillons testés ont un comportement plus "traditionnel", avec une désaimantation progressive au fur et à mesure de la montée en température.

## Lots rejetés

Après étude deux lots sont rejetés : 80035A et 80035D.

Lot 80035A : sur 8 échantillons étudiés, cinq portent des aimantations de type multicomposante. Les carottes étant extraites d'un four, les composantes multiples proviennent probablement de la cuisson des pièces (composante de haute température) puis de leur réchauffement à des températures inférieures aux températures de Curie (composante de basse température), lors du fonctionnement du four. Des trois échantillons restants, deux montrent une disposition des points incurvée, malgré des tests d'ATR partielle corrects. Ce site qui pourtant a donné d'excellents résultats en archéomagnétisme de direction (les diagrammes de désaimantation sont univectoriels) est donc rejeté pour l'étude d'archéointensité.

Lot 80035D : trois des huit échantillons montrent une aimantation multicomposante. Les cinq autres échantillons ont une aimantation monocomposante, ainsi que des tests de Thellier corrects, mais les points ARN-ATR sont disposés selon des arcs de cercle et l'utilisation des premiers points amène à une surestimation de l'intensité (fig. III-18-d).

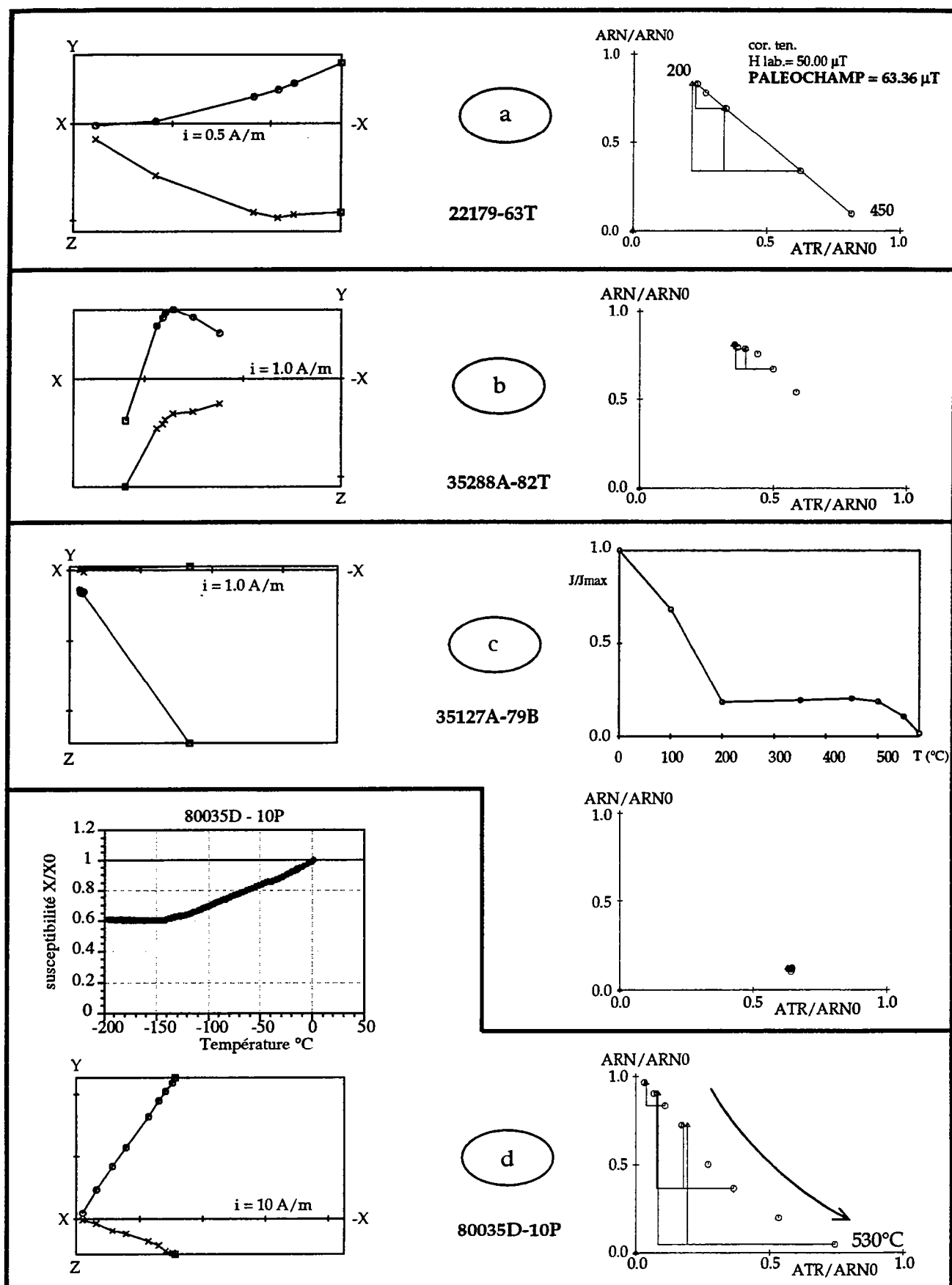


fig. III-18 : échantillons et lots rejetés :

- a : échantillon 22179-63T. Le zijderveld présente une désaimantation irrégulière, alors que les points dans le diagramme d'Arai sont disposés selon une ligne droite.
- b : l'ARN de l'échantillon 35288A-82T est composée d'une aimantation secondaire et d'une aimantation primaire.
- c : l'échantillon 35127A-79B est caractérisé par une désaimantation très rapide entre 20 et 200 $^{\circ}$ C, bien visible sur la courbe de désaimantation thermique. Cet échantillon est inutilisable pour la détermination de l'intensité.
- d : courbe de variation de la susceptibilité en fonction de la température, diagramme de Zijderveld et d'Arai de l'échantillon 80035D-10P. Malgré un Zijderveld correct, cet échantillon présente une disposition sur une ligne courbe des points ARN-ATR.

### III-4-3 Discussion des résultats

Le nombre d'échantillons utilisés pour la détermination de l'intensité pondérée au site varie de huit à onze échantillons. Nous présentons aussi le lot 35127A, bien que seuls quatre échantillons aient permis la détermination de l'intensité.

L'erreur standard associée à l'estimation d'intensité moyenne (deux écarts-type) varie entre 2 et 6.5% du champ estimé (31TAB3 et 72225A). Cette valeur est particulièrement intéressante dans l'optique d'une bonne précision dans la restitution de la courbe de variation de l'intensité, et d'une possible application de l'archéointensité à la datation.

Afin de pouvoir faire des comparaisons entre sites, les valeurs de champ sont recalculées pour la latitude de Paris (cf. chapitre V)), à partir de l'intensité moyenne pondérée (tableau III-10).

lot	Age	$\lambda$	Fs	Fpo	F Pa $\pm$ i95	D	I	VDM	VADM
	ap. J.-C	°N	$\mu$ T		$\mu$ T	°	°	$10^{22}\text{Am}^2$	$10^{22}\text{Am}^2$
31HLR2	-80 à 50	43.58	60.2	61.5	$64.9 \pm 2.8$		$64.0 \pm 2.5$	9.99	10.20
31HLP	-20 à 60	43.58	60.2	60.0	$63.4 \pm 2.0$		$61.0 \pm 2.0$	10.10	9.97
72225A	50 à 100	48.40	66.8	67.1	$67.4 \pm 4.3$		$63.5 \pm 1.5$	11.00	10.60
70LUX-F	150-220	47.83	70.0	70.1	$70.8 \pm 2.3$	$0.9 \pm 4.1$	$58.5 \pm 2.5$	12.20	11.10
22179A	210-270	48.66	68.1	68.3	$68.5 \pm 2.6$		$67.0 \pm 1.0$	10.70	10.80
35127A	300-360	47.91	64.3	63.3	$63.9 \pm 3.1$		$57.3 \pm 1.0$	11.40	10.00
35288A	360-400	48.67	66.9	67.0	$67.1 \pm 1.5$		$61.0 \pm 1.5$	11.30	10.60
53169A	1340-1400	48.08	61.6	61.5	$62.0 \pm 2.0$		$52.5 \pm 1.5$	11.60	9.75
31TAB1	1400-1470	43.58	55.7	55.4	$58.5 \pm 1.4$		$53.0 \pm 2.5$	10.30	9.20
31TAB3	1420-1470	43.58	54.2	54.2	$57.2 \pm 1.1$		$54.0 \pm 2.0$	10.00	9.00
49127A	1650-1750	47.67	50.4	51.3	$51.8 \pm 2.5$		$75.0 \pm 5.0$	7.26	8.16

tableau n° III-10 : résumé des caractéristiques magnétiques moyennes des lots utilisés pour la détermination de l'archéointensité. lot, référence des lots, Age, âge attribué au site,  $\lambda$  latitude du site, Fs, estimation de l'archéointensité au site, Fpo, intensité moyenne pondérée, F Pa, estimation de l'archéointensité à la latitude de Paris (après correction de latitude) et son intervalle de confiance à 95%, D, déclinaison moyenne, I, inclinaison moyenne au site, VDM, moment dipolaire virtuel, VADM, moment du dipôle axial centré virtuel.

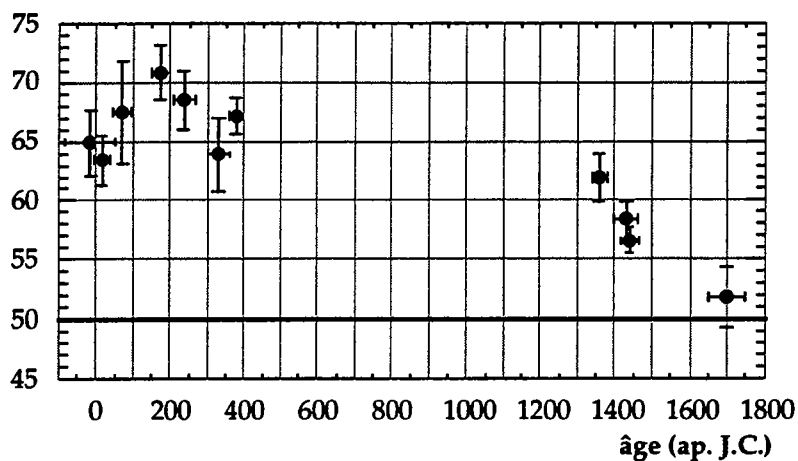
### III-5 Analyse des valeurs d'intensité.

Les données sont réparties selon deux groupes d'âges distincts, Gallo-romain et "Moderne". Nous noterons dans la figure III-19-a, que la disposition des points représentant les valeurs est cohérente et que ceux-ci semblent s'ordonner.

Nous allons d'abord décrire les résultats des quatre sites les plus "jeunes".

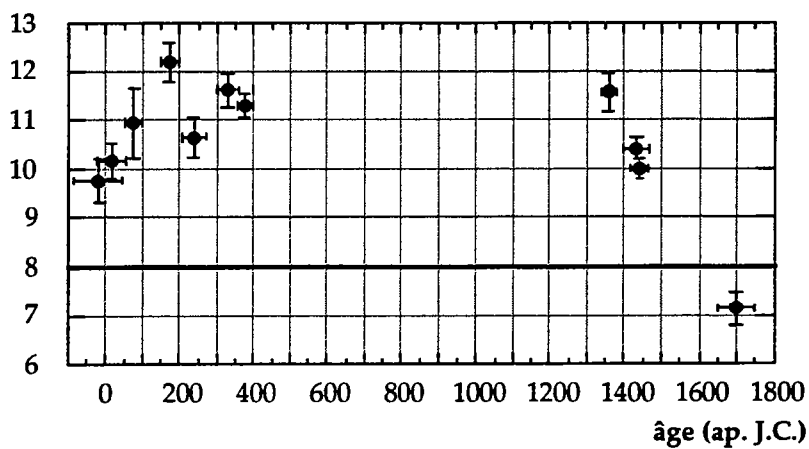
Intensité pondérée  
moyenne à la latitude  
de Paris  
( $\mu T$ )

a



VDM  
(1022 Am<sup>2</sup>)

b



VADM  
(1022 Am<sup>2</sup>)

c

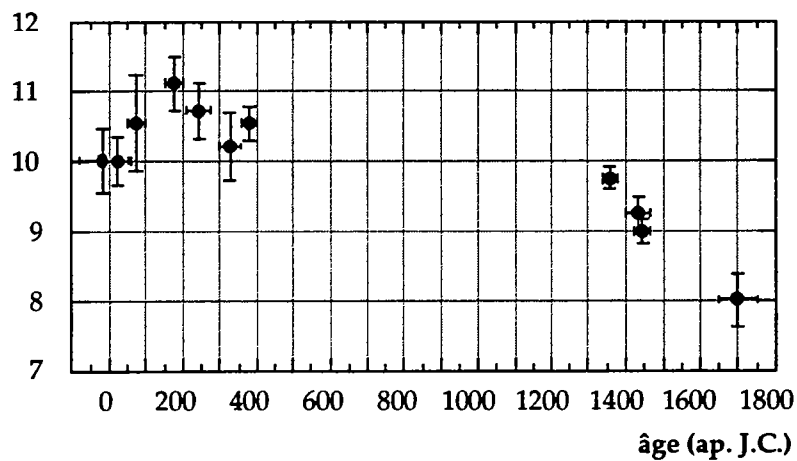


fig. III-19 : variation des valeurs d'intensité, de VDM et VADM au cours du temps, d'après les résultats obtenus dans nos expériences. Nous avons utilisé pour calculer les VDMs moyens la valeur moyenne d'inclinaison établie pour le lot, au laboratoire d'Archéométrie.



#### A) Données modernes : entre 1340 et 1750 environ

Les trois sites 53169A, 31TAB1, 31TAB3, constituent une série temporelle de 1340-1400 à 1420-1470 ap. J.-C. Les résultats obtenus décrivent un champ dont l'intensité décroît (à la latitude de Paris) de  $62.0 \pm 2.0$  à  $57.2 \pm 1.0$   $\mu\text{T}$ , soit grossièrement 5  $\mu\text{T}$  en un siècle environ. On remarquera que cette tendance est confirmée par le résultat de l'étude par Thellier et Thellier (1959) de 7 tuiles provenant de Lille, datées de 1460 et dont l'intensité de champ est estimée de 56  $\mu\text{T}$ , soit 55.1  $\mu\text{T}$  à Paris.

Le résultat du site 49127A est isolé. La valeur de  $53.2 \pm 2.5$   $\mu\text{T}$  à Paris, si elle était rattachée aux quatre données précédentes, indiquerait une très légère décroissance entre 1450 et  $1700 \pm 50$  ap. J.-C., de l'ordre de 3.5  $\mu\text{T}$  par siècle environ. Mais ce résultat est trop isolé en âge pour être utilisé pour décrire la tendance de l'intensité du champ. On remarquera toutefois que la modélisation de l'intensité du champ à la latitude de Paris par l'utilisation du modèle Bloxham et Jackson (1992) permet de calculer vers 1700 ap. J.-C. une intensité de 50  $\mu\text{T}$ , valeur très proche de celle obtenue pour 49127A.

#### B) Données gallo-romaines : de -80 av. J.-C. à 400 ap. J.-C.

Toutes ces données, obtenues à partir de l'étude de sites de provenances géographiques différentes s'intègrent les unes aux autres de façon très satisfaisante (fig. III-19-a). Il est donc possible d'avoir une vision claire de la variation de l'intensité du champ à Lutèce (Paris) durant la période gallo-romaine.

- l'intensité du champ, estimée à 65  $\mu\text{T}$  environ au début de notre ère, aurait augmenté jusqu'en  $185 \pm 35$  ap. J.-C., où l'on observe une valeur de  $\approx 70$   $\mu\text{T}$ , et aurait diminué pour atteindre environ 65  $\mu\text{T}$  en fin du quatrième siècle.

Le cas du lot 35127A pose un petit problème d'interprétation, car l'intensité estimée est notablement plus faible que celle observée pour 35288A, pourtant d'âge contemporain. En fait ces valeurs sont recoupées en tenant compte des incertitudes associées. Nous ne pouvons donc pas savoir si la position dans la diagramme de 35127A correspond à une réalité historique ou à un artefact lié au faible nombre d'échantillons.

Durant toute cette période la variation du champ serait donc très faible, de l'ordre de 5  $\mu\text{T}$  en  $\approx 200$  ans (fig. III-19-a)

Cette variation est légèrement inférieure à celle mesurée dans la période moderne où nous observons un taux de variation de 5  $\mu\text{T}$  par siècle.

Les variations de la valeur du Moment Dipolaire Virtuel (VDM en anglais) et du moment du dipôle axial (VADM) sont présentés figure III-19.

De façon générale les valeurs du VDM sont élevées, entre 10 et 12  $10^{22} \text{Am}^2$  au lieu des 8  $10^{22} \text{Am}^2$  observés actuellement. Il faut noter la faible valeur obtenue pour le lot 22179 ( $240 \pm 30$  ap. J.C.) due à la forte inclinaison au site.

### III-6 Conclusion

L'utilisation d'un matériel stable à la chauffe (terres cuites bien datées) associée à une méthode éprouvée (Méthode Thellier-Thellier, 1959), utilisée avec les précautions nécessaires (faible viscosité des échantillons, correction d'anisotropie, correction de vitesse de refroidissement, ...) a permis l'acquisition de nouvelles données sur la variation de l'intensité du champ magnétique terrestre en France durant la période historique, avec un taux de réussite élevé (75% minimum). Le bon recouvrement des résultats est un facteur encourageant pour la poursuite de cette démarche.

Bien qu'encore de façon très fragmentaire la vision de la variation de l'intensité est plus complète surtout en ce qui concerne la période gallo-romaine, où le champ alors d'intensité plus élevée qu'actuellement ( $65 \mu\text{T}$  en moyenne contre  $47 \mu\text{T}$  à présent), semble avoir connu une légère augmentation vers 180 ap. J.-C. (presque 10%, avec  $70 \mu\text{T}$ ). Du fait de l'absence (temporaire) de matériel à étudier, un grande lacune existe entre 400 ap. J.-C. et 1300 ap. J.-C. Le champ semble avoir connu par la suite, de 1340 à 1470 ap. J.-C., une décroissance de 62 à  $57 \mu\text{T}$  environ. La valeur obtenue pour la donnée du site 49127A, daté 1700 ap. J.-C., est hélas trop isolée pour être rattachée à quelque tendance qu'il soit. Toutefois l'utilisation du modèle Bloxham et Jackson 1992 laisserait présumer que le champ aurait alors atteint une valeur proche de  $50 \mu\text{T}$ . Les premières mesures directes sommaires effectuées à Paris débutent en 1848 avec une mesure de l'intensité du champ égale à  $47.1 \mu\text{T}$  (Thellier-Thellier, 1959).

L'utilisation du modèle de Bloxham-Jackson (1992) a permis de calculer une variation de l'intensité du champ supérieure ou égale à  $10 \mu\text{T}$  en 100 ans pour une région placée au Sud de l'Amérique du Sud, zone choisie comme ayant connu la plus grande variation entre 1850 et 1950. La fourchette de variation obtenue à partir de nos données est compatible avec cette valeur, mais reste bien inférieure ( $5 \mu\text{T}$  par siècle).

Nos résultats sont encore trop dispersés pour pouvoir établir des relations entre la variation de l'intensité et la variation des directions, inclinaisons et déclinaisons. On remarque toutefois que la valeur la plus élevée de l'intensité en 180 ap. J.-C. correspond à la valeur la plus faible de l'inclinaison reconstituée dans la période gallo-romaine ( $57.5^\circ$ ) à Paris.

La faiblesse de cette variation, si elle est confirmée, présente un inconvénient pour la datation par archéointensité. L'amplitude de variation atteinte est faible par rapport à la marge d'erreur de chaque estimation. La précision de la datation est donc limitée, et l'utilisation unique de

l'archéointensité comme méthode de datation est compromise. Elle apparaît par contre comme un excellent complément pour la datation par archéomagnétisme "classique" : les valeurs d'inclinaison observées de 50 ap. J.-C. à 100 ap. J.-C., 200 et 290 ap. J.-C. sont identiques, alors que les valeurs d'intensité observées sont plus faibles en 50-100 ap. J.-C., plus élevée en 200 ap. J.-C. et légèrement plus faible en 290 ap. J.-C. (quoique difficile à distinguer de l'intensité en 200 ap. J.-C.). L'utilisation de l'archéointensité pourrait donc être un élément discriminant dans la datation par archéomagnétisme.

Nous reviendrons sur ces interprétations et les débouchés qui pourrait en découler dans le chapitre V.



## **Chapitre IV**

### **Etude d'Archéointensité sur le site de Sallèles-d'Aude**

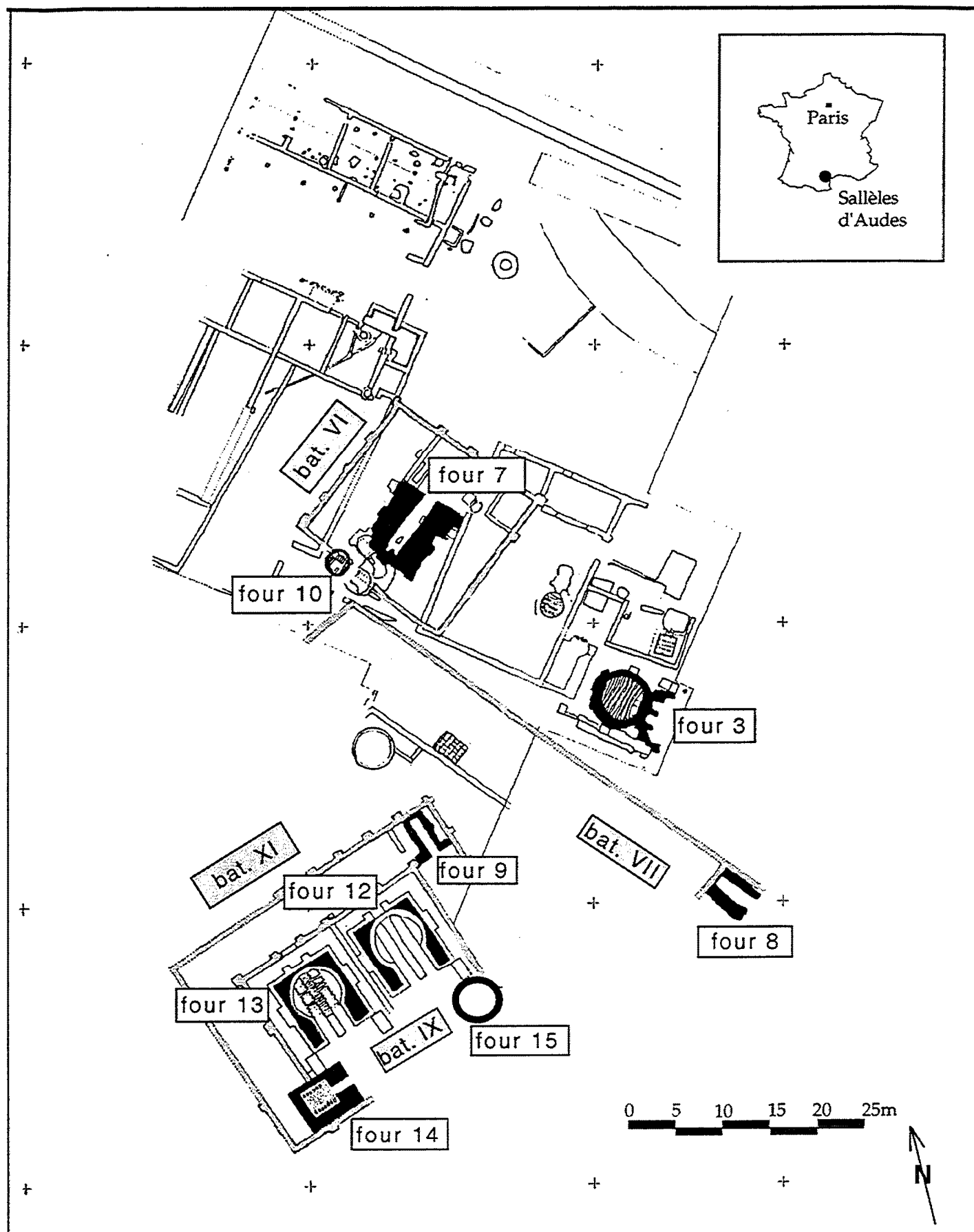


fig. IV-1 : plan des fouilles du site de Sallèles d'Aude (Laubenheimer, 1990). En noir, emplacement des fours étudiés en archéointensité. En grisé, principaux bâtiments cités.

En insert : localisation de Sallèles d'Aude sur la carte de France.

## IV Etude d'Archéointensité sur le site de Sallèles-d'Aude

### IV-1 Introduction

Le site de Sallèles-d'Aude (latitude 43.16°), est situé près de Narbonne (fig. IV-1). dans le département de l'Aude (11). C'est un vaste complexe de potiers gallo-romain dont la fouille et l'étude archéologique est réalisée par l'équipe dirigée par F. Laubenheimer.

Cet ensemble présente plusieurs points d'intérêts pour une étude d'archéointensité :

- le nombre de fours est élevé (une quinzaine). Les pièces de chauffe sont bien conservées, ainsi que les parties basses des fours (arcs de soutènement des soles, cf. en annexe la description simplifiée d'un four), ce qui a permis de nombreux prélèvements dans les zones ayant atteint de hautes températures. Des restes de chargements homogènes d'amphores et de tuiles ont aussi été dégagés,

- une analyse des directions archéomagnétiques, enregistrées par les fours lors de leur fonctionnement, a été réalisée par P. Lanos du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I (prélèvements effectués en 1990 et 1992),

- la confrontation des déductions issues de la fouille et des solutions apportées par la datation archéomagnétique a permis de proposer une chronologie du fonctionnement et de l'abandon des fours qui s'étend sur trois siècles. Il est donc possible d'échantillonner plusieurs lots d'âges différents, répartis sur 300 ans.

- le regroupement géographique permet de comparer directement les caractéristiques magnétiques enregistrées dans le temps sans obligation de correction de latitude. C'est donc un gisement au potentiel très important pour une étude d'archéointensité.

Les résultats d'une telle étude seront analysés selon deux objectifs différents :

- nous allons tout d'abord pouvoir tester la chronologie établie par les études archéologiques et archéomagnétiques. L'archéointensité, estimée à partir d'échantillons prélevés sur des fours ayant arrêté de fonctionner dans les mêmes périodes, doit théoriquement être identique,

- dans la mesure où ce cap serait franchi sans encombre (résultats cohérents), nous devrions alors pouvoir établir une séquence de la courbe de variation de l'intensité durant l'Antiquité. Comme nous l'avons évoqué au chapitre I, il n'existe pas encore à l'heure actuelle de modèle de cette variation en Europe de l'ouest, car les données disponibles sont trop rares et difficilement corrélables (cf. Kovacheva & al. 1995, ou fig. I-33). Mais nous avons présenté dans le chapitre III d'autres résultats, entre autres pour la période de l'Antiquité, et nous espérons pouvoir les comparer avec les estimations réalisées sur Sallèles.

Cette confrontation pourrait permettre d'avoir une vision plus synthétique de la variation de l'intensité dans le temps. Sinon les résultats obtenus, en âge et en intensité, pourraient être remis en question ...

## IV-2 Caractéristiques des fours et lot d'amphores

### contexte archéologique des fours et directions archéomagnétiques

- **four n° 3** (noté 11salf3 par la suite) : les fours n° 1, 2 et 3 correspondent au même emplacement mais à trois états successifs de construction. Le four n°3, dont les limites sont bien dégagées des fours 2 et 1, est à sole circulaire et double alandier. Les éléments trouvés dans la tranchée de fondation du laboratoire suggèrent une construction au plus tôt vers le milieu du I<sup>er</sup> s. La couche de cendre provenant du fonctionnement du four contient du matériel daté au minimum de la seconde moitié du I<sup>er</sup> s. Durant son service le four atteint de hautes températures et, malgré les réparations, les arcs de support de la sole se dégradent et finissent par se rompre. Suite à son abandon, le four sert de dépotoir et est peu à peu rempli avec du matériel de rejet. Ce matériel évoque un comblement effectué vers le milieu du II<sup>e</sup> s., ou, peut être, dans la deuxième moitié (Laubenheimer 1990).

Une première datation archéomagnétique a été réalisée par le Dr Ian Hedley, par la mesure des directions magnétiques de six échantillons prélevés *in-situ*. Celui-ci a proposé une date d'arrêt de fonctionnement du four en  $100 \pm 20$  ap. J.C.

Une deuxième analyse a depuis été effectuée par P. Lanos, au Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I. Le résultat des mesures de 13 échantillons, prélevés en place, sur les arcs de la sole, permet d'obtenir les directions moyennes suivantes : inclinaison  $I = 56.1 \pm 1.7^\circ$ ,  $61.5 \pm 1.7^\circ$  à Paris, déclinaison  $D = 0.2 \pm 3.0^\circ$ .

- **four n° 7** (11salf7) : ce four a lui aussi été reconstruit (Laubenheimer, 1990). La première phase correspondrait à la construction synchrone d'un édifice, le bâtiment n° VI, dans l'assise de fondation duquel il a été trouvé un as léger de l'impératrice Plautille (202-205 ap. J.C.). Cette pièce de monnaie situe l'implantation du bâtiment vers le début du III<sup>e</sup> s. au plus tôt. Le four a été édifié avec du matériel rejeté dans lequel on remarque des fragments d'amphores G4. La couche initiale est constituée d'un dépôt d'argile verte à l'intérieur de laquelle quelques tessons de céramique commune, d'autres fragments d'amphores G4 et quelques sigillées ont été dégagés.

L'effondrement ainsi que d'autres dégradations marquent la fin du fonctionnement du four dans sa première configuration.

Suite à cette première phase, un four est réinstallé dans les structures conservées de l'ancien. Celui-ci prend place à l'emplacement de l'ancienne salle de chauffe et est identifiable par sa surélévation et une taille nettement inférieure. Il est de forme carré avec un alandier unique. Cette



seconde phase s'achèvera à son tour par l'effondrement de la sole et des structures supérieures de la salle de chauffe. Le matériel de comblement est essentiellement composé de fragments de tuiles et d'amphores G4. Un fragment de céramique (marli d'assiette caractéristique des productions narbonnaises et marseillaises du IV<sup>e</sup> s.) retrouvé au sein de la couche arable pourrait dater l'arrêt de fonctionnement du four dans sa deuxième phase.

Les données archéologiques présentent donc le four n°7 comme ayant subi de nombreux remaniements lors de son existence, dès le III<sup>e</sup> s. avec peut être un arrêt du fonctionnement vers la fin de ce même siècle.

L'étude archéomagnétique de ce four est basée sur la mesure de 15 échantillons prélevés *in situ* sur les parois de l'alandier et sur un pilier de soutènement de la sole. L'inclinaison moyenne et déclinaison moyenne sont :  $I = 58.5 \pm 2.3^\circ$ , soit  $63.7 \pm 2.3^\circ$  à Paris,  $D = 1.2 \pm 4.3^\circ$ .

- four n° 8 (11salf8) : le four n° 8 s'adosse au bâtiment n°VII, lequel correspond aux alignements du bâtiment n°VI. Ces directions sont attribuées au remodelage de l'architecture du site effectué au III<sup>e</sup> s. La céramique commune trouvée en comblement de ce four a les caractéristiques de cette période tardive (Laubenheimer 1990).

9 des 15 échantillons prélevés sur place permettent de calculer les valeurs moyennes  $I = 56.5 \pm 2.8^\circ$  ( $61.9 \pm 2.8^\circ$  à Paris),  $D = -2.8 \pm 5.1^\circ$ .

- four n° 9 (11salf9) : ce four s'inscrit entre les murs de la galerie Est du bâtiment n°XI. Ce bâtiment, qui contient aussi les fours n° 12, 13 14 et 15 a connu sa première phase de construction très tôt durant la période augustéenne (-63 à 14 ap. J.C.) comme en témoigne la présence de céramiques datées de cette période. Suivent une phase de destruction et une nouvelle phase de construction au second siècle (Laubenheimer, 1990).

Le four n°9 est de type rectangulaire avec un unique alandier. Des deux phases d'utilisation connues, la première s'achève par l'effondrement d'un mur dans le *praefurnium*.

Une vingtaine d'échantillons ont été prélevés en bordure de l'alandier. Après étude archéomagnétique une inclinaison  $I = 62.3 \pm 2.0^\circ$  est calculée à la latitude de Paris ( $I = 56.9 \pm 2.0^\circ$ ,  $D = 0.3 \pm 3.6^\circ$ ).

- four n° 10 (11salf10) : four circulaire, retrouvé en dessous d'un mur du bâtiment VI. La présence du four n°7 et du bâtiment VI dans les couches supérieures à celles du four n°10 font penser que ce four a cessé de fonctionner avant le début du troisième siècle.

L'analyse archéomagnétique ( $I = 62.5 \pm 1.8^\circ$ ,  $I = 67.2 \pm 1.8^\circ$  à Paris,  $D = 0.2 \pm 3.9^\circ$ ), a été réalisée à partir de 9 échantillons prélevés sur la sole et les piliers de soutènement de la sole

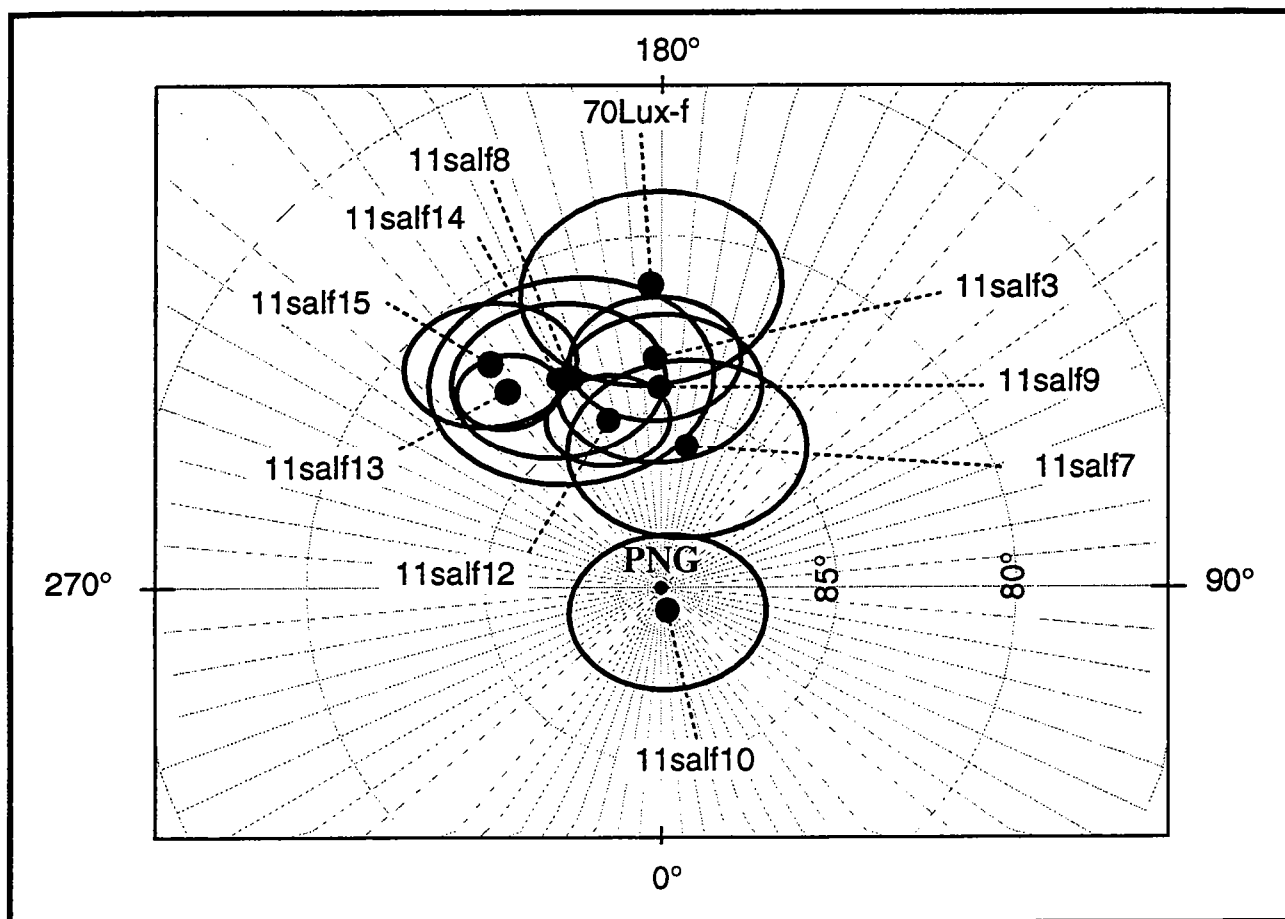


fig. IV-2 : projection stéréographique des Pôles Géomagnétiques Virtuels calculés à partir des directions moyennes des lots de Sallèles d'Aude. A ceux-ci est rajouté le PGV obtenu pour le lot 70LUX-F dont l'étude est développée au chapitre III.

Les quatre fours suivants posent les principaux problèmes de datation. Les fours 12, 13, 14 et 15 sont en effet retrouvés ensembles dans un corps de bâtiment qui semble avoir été construit autour des fours 12 et 13. Comme nous allons le voir les contraintes archéologiques de datation sont faibles (Laubenheimer 1992).

- **four n° 12 (11salf12)** : ce four à sole circulaire et deux alandiers est le jumeau du four n°13 avec lequel il partage deux parties symétriques du bâtiment XI (qui contient aussi le four 9 dans une galerie adjacente).

L'arrêt du fonctionnement de ce four est marqué par la construction du four n° 15 qui vient obstruer l'accès au chargement du foyer.

Les résultats de l'étude archéomagnétique des 19 échantillons prélevés in situ sont :  $I = 57.8 \pm 1.2^\circ$ ,  $I = 63.0 \pm 1.2^\circ$  à Paris,  $D = -1.6 \pm 2.2^\circ$ .

- **four n° 13 (11salf13)** : la description est identique à celle du four n°12. Le four n°13 semble être abandonné mais non détruit lorsqu'est installé le four n°14 qui comme le four n°15 obstrue l'accès du foyer. Directions magnétiques de 25 échantillons prélevés in situ :  $I = 56.7 \pm 1.0^\circ$ ,  $I = 62.1 \pm 1.0^\circ$  à Paris,  $D = -5.1 \pm 1.8^\circ$ .

- **four n° 14 (11salf14)** : ce four, de forme carrée, est donc implanté en avant du four n°13. Il se serait effondré avant que le four n°13 ne fasse de même. L'analyse archéomagnétique a été effectuée à partir de la mesure de quatorze échantillons :  $I = 56.5 \pm 2.1^\circ$ ,  $61.9 \pm 2.1^\circ$  à Paris,  $D = -3.3 \pm 3.8^\circ$ .

- **four n° 15 (11salf15)** : c'est un four de forme circulaire bâti devant le four n°12. Les mesures ( $I = 55.9 \pm 1.7^\circ$ ,  $61.4 \pm 1.7^\circ$  à Paris,  $D = -5.6 \pm 3.0^\circ$ ) ont été effectuées à partir de 20 échantillons prélevés en place.

Le lot d'amphores (11sal-A7) a été retrouvé dans un dépôt attenant au four n°7 et servant pour le rejet des ratés de cuisson. Ce type d'amphores est habituellement associé à la production du troisième siècle. L'étude archéomagnétique est inachevée et nous ne pouvons donc pas préciser cette datation.

## Projection des Pôles Géomagnétiques Virtuels (PGV)

Nous avons calculés les PGV associés aux directions archéomagnétiques (tableau IV-1).

La projection de ces pôles et de leur cercle de confiance associée permet de faire les constatations suivantes (fig. IV-2) :

- le lot 70LUX-F se distingue des lots 11salf13 et 11salf10
- Le lot 11salf10 est nettement isolé des 9 autres,

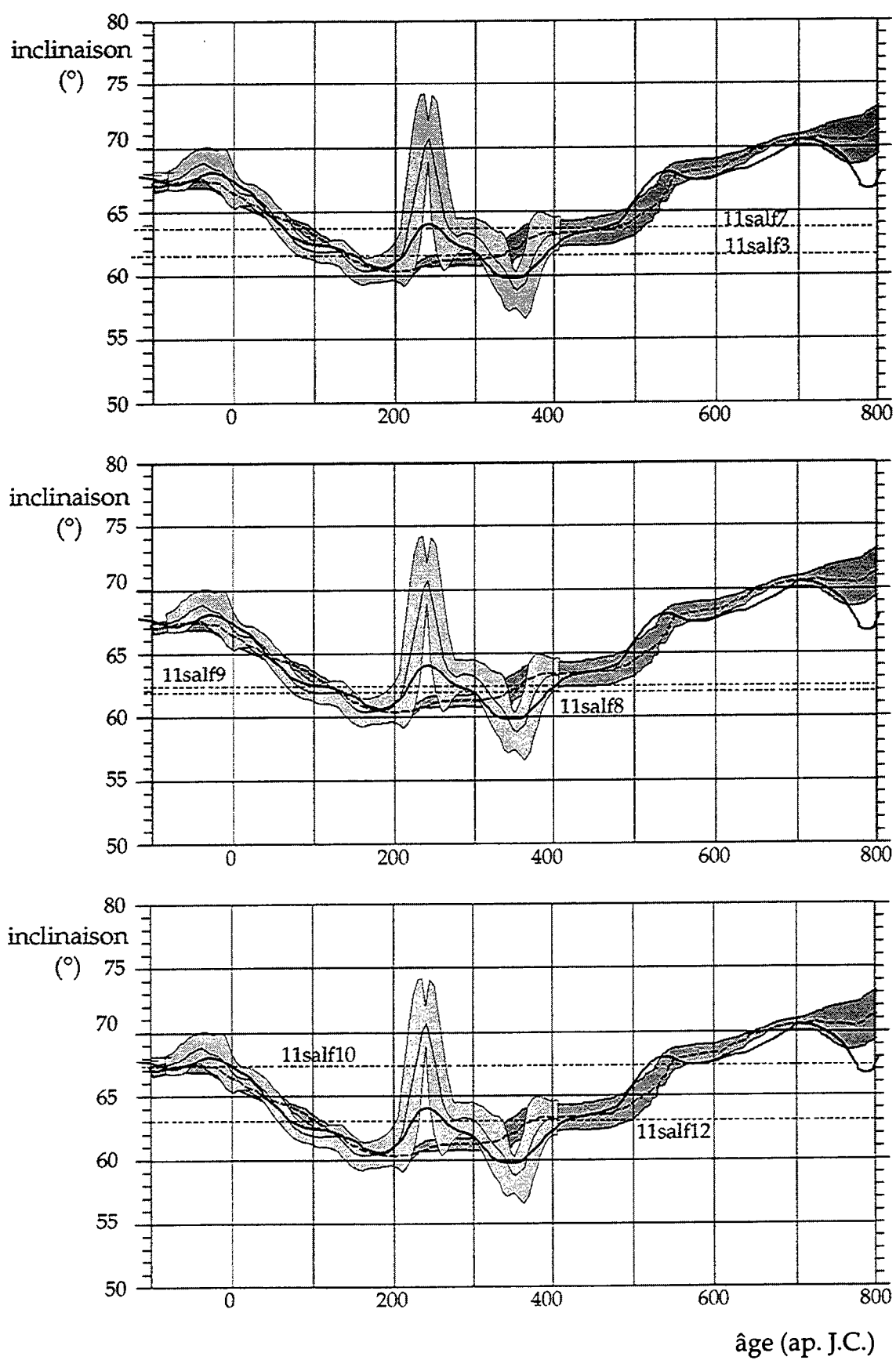


fig. IV-3 (début) : datation archéomagnétique des fours de Sallèles-d'Aude.

- les lots 11salf15 et 11salf13 sont incompatibles avec les lots 11salf3, 11salf9, 11salf7 et 11salf12, leurs valeurs moyennes et cercles de confiance ne se recoupant pas,
- trois couples se dégagent de par leurs valeurs moyennes proches, 11salf15 et 11salf13, 11salf8 et 11salf14 et 11salf9 et 11salf3.

lot	Dm $\pm \sigma D$ (°)	Im $\pm \sigma I$ (°)	Lat. PGV (°)	Long. PGV (°)
11salf3	0.2 $\pm$ 3.0	56.1 $\pm$ 1.7	83.5	181.3
11salf7	1.2 $\pm$ 4.3	58.5 $\pm$ 2.3	85.9	169.4
11salf8	-2.8 $\pm$ 5.1	56.5 $\pm$ 2.8	83.5	203.3
11salf9	0.3 $\pm$ 3.6	56.9 $\pm$ 2.0	84.3	180.6
11salf10	0.2 $\pm$ 3.9	62.5 $\pm$ 1.8	89.3	17.7
11salf12	-1.6 $\pm$ 2.2	57.8 $\pm$ 1.2	85.0	197.6
11salf13	-5.1 $\pm$ 1.8	56.7 $\pm$ 1.0	82.9	218.6
11salf14	-3.3 $\pm$ 3.8	56.5 $\pm$ 2.1	83.4	206.3
11salf15	-5.6 $\pm$ 3.0	55.9 $\pm$ 1.7	82.0	217.5
70LUX-F	0.9 $\pm$ 4.1	58.5 $\pm$ 2.5	81.7	181.4

tableau IV-1 : estimations des directions magnétiques des pôles géomagnétiques virtuels, Dm  $\pm \sigma D$ , déclinaison moyenne du lot, Im  $\pm \sigma I$ , inclinaison moyenne au site, Lat. PGV, latitude et, Long. PGV, longitude PGV.

### Proposition d'une chronologie d'arrêts de fonctionnement des fours

Nous sommes ici aussi confrontés au problème déjà évoqué au chapitre III : depuis que ces travaux ont été réalisés, les courbes de variation séculaire de l'inclinaison ont été réactualisées.

Postérieurement à l'étude de ce site nous avons donc repris notre démarche de vérification des solutions archéomagnétiques.

Des trois courbes d'inclinaison actuellement à notre disposition, notre préférence est allée vers la courbe publiée par Lanos en 1990, et vers la courbe spline cubique calculée à partir de toutes les données confondues (fig. IV-3). En effet les contraintes archéologiques et les valeurs d'inclinaison observées pour des lots tel Fréhel, ou Guignen (cf chapitre III), ne sont compatibles qu'avec ces deux courbes.

Nous avons rapporté à la fin de ce paragraphe un tableau (tab. IV-2) qui présente :

- les âges correspondant à l'intersection de l'inclinaison moyenne du lot avec chacune des courbes moyennes de variation,
- les segments d'âge correspondant à l'intersection de l'inclinaison moyenne du lot avec les enveloppes d'erreur des courbes de variation (Lanos 1990 et Bucur 1994)

Cette différenciation est particulièrement importante dans le cadre de Sallèles pour obtenir des solutions de datations qui soient logiques et compatibles avec les contraintes archéologiques dégagées par la fouille, mais aussi compatibles avec les datations et les valeurs de direction magnétique des lots étudiés au chapitre III (le four 70LUX-F particulièrement).

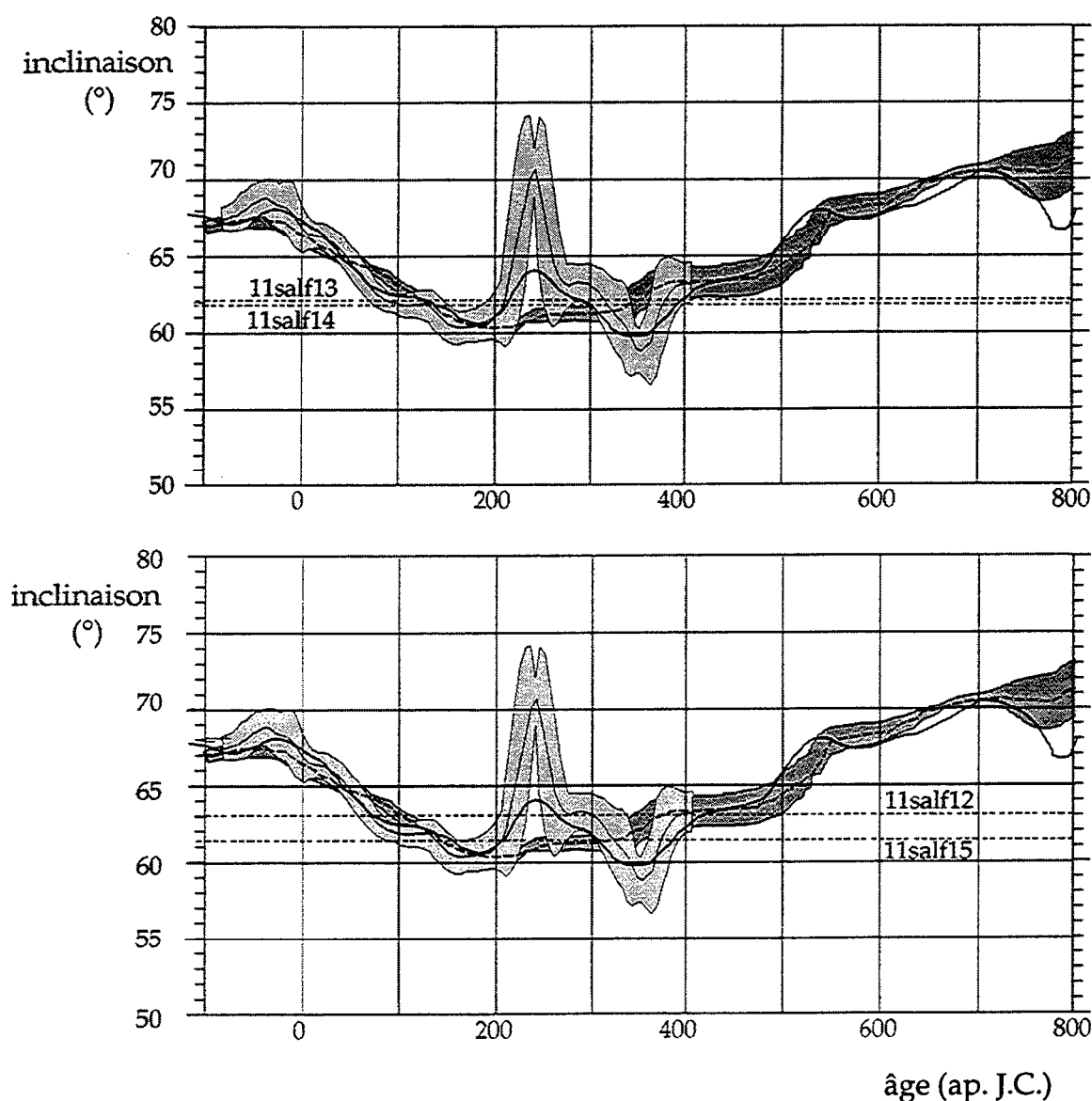


fig. IV-3 (fin) : datation archéomagnétique des fours de Sallèles-d'Aude.

- trait fin avec une bande en gris clair : courbe de variation de l'inclinaison durant la période gallo-romaine, proposée par le Laboratoire d'Archéométrie (UMR 153), Lanos 1990.
- trait en pointillé avec bande gris-sombre : courbe de variation de l'inclinaison selon Bucur (1994).
- trait épais continu : traitement en spline cubique de l'ensemble des données des deux références précédentes (cf. chapitre V). Le calcul de l'enveloppe d'erreur associée à la courbe spline moyenne est actuellement en cours de développement.
- en trait fin et pointillés sont reportées les valeurs d'inclinaison calculées pour chaque lot.

L'intersection de ces droites avec les courbes donne les solutions potentielles de datation archéomagnétique. La décision finale est prise en fonction du contexte archéologique (voir texte).

Les directions similaires des fours 13 et 15 nous font penser que ceux-ci ont put cesser de fonctionner en même temps. La construction du four 15 bloquant l'accès au four 12, ceci impliquerait que le four 12 ait été abandonné avant les fours 13 et 15. Le bâtiment XI, construit sur un plan qui englobe les fours 12 et 13, semble avoir été bâti juste avant ou au début de l'ère chrétienne. Des solutions de datation de cette période pourraient donc correspondre pour les fours 12 et 13.

Si nous utilisons uniquement les valeurs d'intercept des enveloppes d'erreur, seules deux solutions archéomagnétiques, quasi-identiques pour ces deux fours 12 et 13, sont alors probables: 50-140 et 190-230 ap. J.C. Cependant le lot 70LUX-F, daté 150-210, porte une direction significativement différente de celles des fours 12 et 13 (fig. IV-3). Ce qui obligerait à dater ces deux fours (12 et 13) d'une solution unique fin du premier siècle, alors que les déclinaisons calculées pour les deux sont incompatibles.

Si nous reprenons les propositions de datation de ces deux lots en tenant compte cette fois des intercepts entre courbes moyennes de variation et inclinaisons, nous nous apercevons qu'une solution existe pourtant : durant le second siècle, l'intercept associé au four 12 est plutôt situé en 70 ap. J.C. (courbes Lanos et spline) et celui du four 13 en 130 ap. J.C. (courbes Bucur, spline, et limite de la courbe Lanos).

Les trois fours 11salf12, 11salf13 et 70LUX-F ont alors trois solutions de datations différentes, compatibles avec les configurations des PGV et le contexte archéologique.

Les marges d'erreurs sont plus ou moins bien déterminées, soit par rapport à l'intersection des enveloppes d'erreur, soit de façon plus ou moins arbitraire comme dans le cas de 11salf13 où la limite est bien définie par l'enveloppe dans les âges supérieurs, mais indéfinie dans les âges inférieurs. Ces valeurs restent donc discutables.

Les directions archéomagnétiques des fours 3 et 9 sont incompatibles avec celles du four 13. Une date d'arrêt en  $210 \pm 20$  pour le four 3, et  $215 \pm 30$  ap. J.C. pour le four 9 nous apparaissent actuellement comme les plus logiques. Ces âges sont de plus compatibles avec celui du four 70LUX-F, daté de cette période, et les directions d'aimantations des fours 3, 9 et 70LUX-F sont proches.

En conséquence d'un arrêt de fonctionnement du four 13 en  $130 \pm 30$ , une solution de datation  $210 \pm 20$  ap. J.C. pourrait marquer l'arrêt de fonctionnement du four 14. Mais les directions magnétiques sont plutôt proches de celles du four 8. Auquel cas nous retiendrons la solution  $310 \pm 30$  pour 11salf14.

En résumé, en référence aux courbes actuelles de variation de l'inclinaison, et en référence aux contextes archéologiques de fonctionnement des fours, nous retenons la chronologie suivante (tableau IV-2) :

Lot	Inclinaison à Paris (°)	contexte archéologique	Solutions archéomagnétiques apJC.	intercept Bucur 94	intercept Lanos 90	intercept Spline	Age attribué ap. J.C.
70LUX-F	59.5 ± 2.5		150-220	aucun	aucun	aucun	185 ± 35
Four N°10 :	67.2 ± 1.8	avant 200	-30à+30, 210-270	-76 à -26, 547	-5, 228, 253, ?	0, 517	0 ± 30
Four N°12 :	63.0 ± 1.2	début premier siècle ?	50-120, 200-230, 250- 350, 360-500	104, 376	72, 214, 278- 300, 393	73, 223, 264, 418	70 ± 20
Four N°13 :	62.1 ± 1.0	début premier siècle ?	70-140, 190-230, 250- 350, 360-430	127, 354	129, 210, 314, 378	133, 215, 290; 389, 398	130 ± 30
Four N°15 :	61.4 ± 1.7	bloque le four 12	80-150, 150-230, 250- 260, 310-340, 350-400	158, 318	137, 207, 324, 373	158, 207, 307, 386	150 ± 30
Four N°3 :	61.5 ± 1.7	150-175	80-150, 150-230, 250- 270, 300-350, 360-400	142, 331	137, 209, 322, 375	155, 211, 305, 388	210 ± 20
Four N°9 :	62.3 ± 2.0	début premier siècle ?	70-130, 200-230, 250- 350, 360-480	121, 356	81, 211, 312, 381	108, 218, 280, 402	215 ± 20
Amphores Gauloises IV		comblement proximité four 7					troisième siècle
Four N°7 :	63.7 ± 2.3	après 200, avant 400 ?	50-100, 205-230, 240- 320, 350-520	90, 470	64, 215, 269, ?	64, 231, 256, 457	265 ± 30
Four N°14 :	61.9 ± 2.1	bloque le four 13	80-140, 180-230, 250- 280, 300-350, 360-400	132, 343	99-132, 211, 317, 377	134, 215, 298, 393	310 ± 30
Four N°8 :	61.9 ± 2.8	remodelage architecture IIIs	80-140, 180-230, 250- 280, 300-350, 360-400	132, 343	99-132, 211, 317, 377	134, 215, 298, 393	310 ± 30

tableau IV-2 : classement chronologique de l'arrêt de fonctionnement des fours et cuisson du lot d'amphores de Sallèles.

Nous remarquons que ces différents fours et amphores présentent une série temporelle s'échelonnant entre le début du premier siècle et le début du quatrième siècle. Certains lots seraient contemporains : fours 13 et 15, fours 3 et 9, fours 8 et 14.

## Sélection des échantillons

Les carottes sélectionnées proviennent d'échantillons déjà prélevés par Lanos pour l'étude archéomagnétique.

Notre échantillonnage a été effectué sur du matériel parfois de petites dimensions, et sur lequel un carottage avait déjà été réalisé. Nos échantillons ne sont pas orientés dans un même référentiel, car le volume des pièces n'a pas permis de toujours carotter dans les repères préétablis.

La numérotation tient compte du n° du four, du n° de prélèvement et du n° de carotte. Par exemple 11salf7-7P1 et 11salf7-7P2 sont deux échantillons provenant de deux carottes (1 et 2) réalisées sur le même prélèvement (7P) du four 11salf7. Par contre 11salf14-1P1A et 11salf14-1P1B sont deux échantillons (A et B) qui proviennent de la même carotte 11salf14-1P1.



Dans la mesure du possible et afin de minimiser les problèmes, les critères suivants ont été appliqués dans le choix des échantillons destinés aux expériences de paléointensité :

- pas ou peu de viscosité (index de viscosité inférieur à 5%),
- une seule composante d'aimantation (nous verrons que ce critère a parfois été reconsidéré expérimentalement),
- une ARN comprise entre 1 A/m et 10 A/m (voir chapitre III).

### IV-3 Etude des caractéristiques magnétiques

La majorité des études de paléointensité ayant porté sur les roches (roches volcaniques surtout), la terre cuite est un matériel qui a été relativement peu étudié du point de vue des analyses magnétiques. Cette tendance est toutefois en train de changer et nous remarquons maintenant des publications qui, traitant de l'archéointensité, commencent elles aussi à présenter des études de la minéralogie magnétique (Yang & al., 1993 a et b, Cui & al., 1995).

Les minéraux magnétiques les plus répandus dans les terres cuites semblent être la magnétite et l'hématite, mais d'autres composants tels que les titanomagnétites à haute ou faible teneur en titane sont aussi cités (Thellier, 1938, Yang & al., 1993b). En fait la minéralogie est rarement constituée d'un composant unique.

### Viscosité des échantillons

Comme nous le voyons dans le tableau IV-3, la viscosité est faible, excepté pour le lot 11salf8 où les fortes valeurs de viscosité correspondent à de faibles valeurs d'ARN (de l'ordre de  $3.0 \cdot 10^{-2}$  A/m), et donc à des échantillons que nous n'avons pas utilisés pour la paléointensité.

lot	viscosité maximale du lot	viscosité maximale des échantillons sélectionnés	valeurs moyennes
11sal-a7	6%	6%	moy/10 : $3.2 \pm 1.3$
11salf3	6%	6%	moy/12 : $2.7 \pm 2.2$
11salf7	12%	7%	moy/19 : $2.6 \pm 1.5$
11salf8	80%	5%	moy/10 : $3.5 \pm 1.3$
11salf9	3%	3%	moy/12 : $1.2 \pm 0.6$
11salf10	3%	3%	moy/11 : $1.5 \pm 0.7$
11salf12	7%	4%	moy/11 : $2.8 \pm 1.2$
11salf13	9%	4%	moy/11 : $1.5 \pm 1.0$
11salf14	6%	3%	moy/12 : $1.6 \pm 0.7$
11salf15	6%	4%	moy/10 : $2.3 \pm 1.0$

Tableau IV-3 : caractéristiques de viscosité des lots.

échantillon	ARN A/m	susc. 10-5 SI	TDM °C	Curie °C	Tb °C	CDM mT	% d100	ARI 0.2T A/m	ARI 1.2T A/m	TDM-I °C	Tb I °C
11sal-A7-3A	2.390	1601				12.0	7.0	38.1	42.5		
11sal-A7-9A	1.840	1390				14.0	10.0	30.0	35.4	190.0	
11sal-A7-15A	2.692	1177									
11sal-A7-16A	5.258	1571	339								
11sal-A7-24A	3.261	1041									
11sal-A7-25A	2.988	1300									
11sal-A7-26A	4.731	1014									
11sal-A7-30A	3.354	1547									
11sal-A7-33A	5.163	1687	254								
11sal-A7-34A	4.550	1965				13.0	5.0	63.8	69.2	175.0	
11sal-A7-37A	1.675	1233	409								
11sal-A7-42A	3.161	1383	302								
11sal-A7-48A	3.962	1510	249								
11sal-A7-49A	2.968	1669	294								
11sal-A7-51A	3.981	1955	310								
11sal f3-1P	1.057	377	300								
11sal f3-2P	1.242	72	233								
11sal f3-3P	3.154	911	330								
11sal f3-4P	1.207	412	261								
11sal f3-5P	2.349	107	250								
11sal f3-5PA	2.240	108				15.0	6.0				
11sal f3-6P	2.239	93	353								
11sal f3-7P	9.081	657	244								
11sal f3-7PA	6.750	720				13.0	1.0	64.5	66.2	155.0	450.0
11sal f3-8P	4.584	249	310								
11sal f3-8PA	4.612	245	314								
11sal f3-9P	0.636	373	288								
11sal f3-10P	1.040	258	318								
11sal f3-10PA	0.890	185				21.0	17.0	8.2	9.0	195.0	
11sal f3-11P	1.336	483	303								
11sal f7-1P	5.713	800		570.0							
11sal f7-1P0	5.445	830	346								
11sal f7-1P1	5.450	777									
11sal f7-2P0	11.69	1259	331								
11sal f7-2P1	0.726	616	200								
11sal f7-3P0	2.280	501				15.0	6.0	27.7	30.5	230.0	580.0
11sal f7-3P1	2.750	583									
11sal f7-3P2	1.672	550	252								
11sal f7-5P0	1.025	67	238								
11sal f7-6P				500.0							
11sal f7-6P0	1.730	190	265		550.0						
11sal f7-6P1	2.290	250				16.0	5.0	30.0	30.7	225.0	550.0
11sal f7-6P3	1.664	170	292								
11sal f7-6P4	2.492	219	292								
11sal f7-6P5	2.104	209	289								
11sal f7-7P1	0.138	285	290								
11sal f7-7P2	0.151	253	187								
11sal f7-8P				450.0							
11sal f7-8P0	9.210	543	282								
11sal f7-8P1	8.690	571				14.0	2.0	82.5	83.7	225.0	550.0
11sal f7-8P2	7.323	432	284								
11sal f7-8P3	9.083	556	279								
11sal f7-8P4	6.651	568	281								
11sal f7-8P5	8.300	568	265	580.0							
11sal f7-9P0	2.468	588	271								
11sal f7-9P1	1.156	613	172								
11sal f7-10P0	3.890	615									
11sal f7-10P1	4.886	607	238								
11sal f7-12P0	1.479	486	256								
11sal f7-12P1	1.654	562	290								
11sal f7-14P				550.0							
11sal f7-14P0	2.283	314	295								
11sal f7-14P1	2.759	323	292								
11sal f7-14P2	3.210	337	275		550.0						
11sal f7-14P3	3.420	323				12.0	2.0	38.6	39.1	225.0	550.0
11sal f7-15P0	8.314	1173	389								

échantillon	ARN A/m	susc. 10-5 SI	TDM °C	Curie °C	Tb °C	CDM mT	% d100	ARI 0.2T A/m	ARI 1.2T A/m	TDM-I °C	Tb I °C
11salf8-1P1	2.200	968				8.0	5.0	24.7	25.5	140.0	
11salf8-1P2	1.867	968									
11salf8-1P3	1.985	894									
11salf8-2P1	0.640	275				16.0	14.0				
11salf8-2P2	1.507	333									
11salf8-3P1B	9.570	651	446								
11salf8-4P1	3.092	670	290								
11salf8-4P2	1.040	452				15.0	11.0				
11salf8-5P1	4.846	944	377								
11salf8-10P1	3.726	642	377								
11salf8-10P2	2.230	507	325								
11salf8-13P1	2.323	812	225								
11salf8-13P2	1.981	521	207								
11salf8-18P2	5.405	377	376								
11salf9-3P	1.011	157	348								
11salf9-5P	3.445	353	482								
11salf9-6P	2.447	223	473								
11salf9-7P	1.117	203	397								
11salf9-8P	1.412	151	442								
11salf9-9P	0.200	179				38.0	44.0	1.2	2.8	154.0	680.0
11salf9-10P	1.439	420	475								
11salf9-12P	3.613	759	453								
11salf9-13P	0.540	263				17.0	7.0				
11salf9-15P	2.247	646	341								
11salf9-16P	1.652	400	401								
11salf9-18PA	2.562	465	469								
11salf9-18PB	1.492	369	418								
11salf9-20P	1.472	426									
11salf10-1P1	3.700	372	277								
11salf10-1P2	2.250	565						20.6	23.6		
11salf10-1P3	2.990	642	250		680.0						
11salf10-1P4	4.217	858	268								
11salf10-2P0	1.723	360	277								
11salf10-2P1	2.987	172	242								
11salf10-3P4	3.300	203	255								
11salf10-3P6	2.790	174	250								
11salf10-3P9	3.750	161	280	530.0							
11salf10-7P	0.400	36				22.0	5.0	4.6	4.8	305.0	
11salf10-9P0	3.385	212	297								
11salf10-9P1	3.372	203									
11salf10-10P				500.0							
11salf10-10P0	1.780	351				15.0	10.0	24.4	25.9	190.0	
11salf10-10P1	1.660	304	317								
11salf10-10P2	2.081	281	310								
11salf10-10P4	1.910	276	310	680.0							
11salf10-12P0	0.769	47	318								
11salf10-12P3	0.751	51	400								
11salf12-2PA	1.413	320	348								
11salf12-2PB	1.310	362				19.0	13.0				
11salf12-3PA	1.671	334	332								
11salf12-3PB	1.450	335				17.0	11.0				
11salf12-5P	1.530	128	332								
11salf12-9P	2.774	165	290								
11salf12-10P	2.978	459	304								
11salf12-11P	1.315	356	349								
11salf12-12PA	1.501	347	302								
11salf12-12PB	1.320	334				14.0	15.0				
11salf12-13P	5.109	271	426								
11salf12-14P	3.852	329	269								
11salf12-15PA	1.375	388	294								
11salf12-15PB	1.595	395	289								
11salf12-18P	2.202	432	301								

échantillon	ARN A/m	susc. 10 <sup>-5</sup> SI	TDM °C	Curie °C	Tb °C	CDM mT	% d100	ARI 0.2T A/m	ARI1.2T A/m	TDM-I °C	TbI °C
11salf13-3P1	2.655	99	299								
11salf13-3P2	1.815	70	279								
11salf13-3P3	1.640	79				15.0	16.0	12.1	15.3	250.0	650.0
11salf13-6P1	1.430	60	297								
11salf13-6P2	1.681	64	300								
11salf13-6P3	1.500	69				18.0	12.0	13.0	14.8	295.0	650.0
11salf13-6P4	1.480	46	325		680.0						
11salf13-9P				520.0							
11salf13-9P1	0.390										
11salf13-12P1	1.819	72	277								
11salf13-12P2	1.687	70	261								
11salf13-12P3	1.610	70				28.0	6.0	13.9	14.5	260.0	550.0
11salf13-12P4	1.720	75	300		550.0						
11salf13-13P1	4.896	1075	419								
11salf13-13P2	3.664	927	392								
11salf13-13P3	6.260	576				15.0	8.0	97.1	100.0	355.0	600.0
11salf13-13P4	1.800	954	385		680.0						
11salf13-14P				550.0							
11salf13-14P1	1.990	72	312								
11salf13-14P2	1.731	71	290								
11salf13-14P3	4.795	196									
11salf13-14P4	1.300	63				15.0	16.0	9.6	12.1	245.0	600.0
11salf13-14P5	1.870	79	325		600.0						
11salf14-1				320.0							
11salf14-1P1	2.510	128	295		600.0						
11salf14-1P1B	2.044	98	305								
11salf14-1P2	2.028	91	296								
11salf14-2P1	1.932	82	285								
11salf14-2P2	1.349	52	298								
11salf14-3P1	2.429	95	358								
11salf14-3P1B	2.311	94	360								
11salf14-3P2	2.080	80	305		550.0						
11salf14-4P				550.0							
11salf14-4P1	2.934	82	276								
11salf14-4P2	1.920	480	265		500.0						
11salf14-4P3	4.702	67	290								
11salf14-7P1	1.610	74	265	600.0							
11salf14-9P1B	1.286	67	266								
11salf14-9P2	1.160	57	269								
11salf14-10P1	1.720	123				17.0	9.0	16.5	17.2	205.0	550.0
11salf14-12P1	3.540	165				19.0	11.0	31.8	33.9	240.0	550.0
11salf14-13P2	3.270	151	275		600.0						
11salf14-16P2	0.809	471				9.0	6.0	12.0	13.4	135.0	550.0
11salf14-17P1	1.880	94				20.0	20.0	17.1	18.7	260.0	550.0
11salf14-17P1B	1.830	98	285		600.0						
11salf14-17P1C	1.785	72	278								
11salf14-17P2	1.802	72	286								
11salf15-1P	6.747	974	371								
11salf15-3P	2.085	555	249								
11salf15-4P	1.690	371	281								
11salf15-6P	1.651	558	235								
11salf15-10P	3.870	426	371								
11salf15-11P	2.448	396	351								
11salf15-11P2	1.850	376				18.0	5.0				
11salf15-12P	2.701	136	435								
11salf15-15P	2.701	142									
11salf15-15P2	2.360	131				27.0	7.0				
11salf15-17P	2.212	280	280								
11salf15-18P	3.846	400	386								
11salf15-19P	2.578	147	430								
11salf15-20P	3.924	640	366								

Tableau IV-4 : caractéristiques magnétiques des échantillons. échantillon, numéro d'échantillon, ARN, aimantation rémanente naturelle à température ambiante, susc., susceptibilité en champ faible à température ambiante, TDM, température de désaimantation thermique de 50% de l'ARN, Curie, température de Curie, Tb, température de blocage de l'ARN, CDM, valeur du champ alternatif pour une désaimantation de 50% de l'ARN, % d100, % d'ARN rémanente après application d'un champ alternatif de 100 mT, ARI 0.2T, valeur de l'ARI après application d'un champ de 0,2T, ARI1.2T, valeur de l'ARI après application d'un champ de 1,2 T, TDM-I, température à appliquer pour désaimanter 50% de l'ARI, Tb I, température de blocage de l'ARI.

### IV-3-1 Minéralogie magnétique

Afin de déterminer la nature des porteurs magnétiques, divers tests ont été réalisés : balances de Curie, désaimantations thermiques de l'ARN, désaimantation par champ alternatif, acquisition d'ARI, etc. Ces différentes caractéristiques sont résumées dans le tableau IV-4.

#### Etudes à la balance de Curie

Beaucoup d'échantillons ont une susceptibilité très faible (tableau IV-4) de ce fait seuls 10 lots de Sallèles seuls 4 ont été utilisés, qui représentent la fourchette d'âges inférieur, intermédiaire et supérieur. Nous pouvons ainsi espérer avoir un aperçu de l'éventail des caractéristiques magnétiques des argiles utilisées tout au long de ces 300 ans de fonctionnement du site.

Ces quatre lots sont les suivants :

- 11salf10 :  $0 \pm 30$  ap. J.C.
- 11salf13 :  $130 \pm 30$  ap. J.C.
- 11salf7 :  $265 \pm 30$  ap. J.C.
- 11salf14 :  $310 \pm 30$  ap. J.C.

Les expériences à la balance de Curie (balance verticale) ont été réalisées à l'air, dans des champs d'intensité variable (de 0,2 à 0,5T) selon la susceptibilité de l'échantillon (fig. IV-4). La poudre de l'échantillon 11salf10-10P, qui a une faible susceptibilité, a été enrichie en particules magnétiques à l'aide d'un petit aimant (échantillon 11salf10-10Pext).

Divers tests ont été inclus dans le cycle de chauffe afin d'étudier l'évolution de l'aimantation de l'échantillon durant la montée en température. Le point de Curie est déterminé par la méthode de prolongation par la tangente au niveau du point d'inflexion (Moskowitz, 1981).

Les caractéristiques des balances de Curie sont regroupées dans la tableau IV-5.

L'évolution en cours de chauffe, ou suite à la chauffe, se présente sous deux formes différentes. La première semble attribuable à une perte de poids consécutive à la chauffe à l'air libre, avec une évaporation d'une partie des composants. Dans ce cas la courbe de refroidissement suit avec un décalage constant la courbe de chauffe (11salf7-1P, 11salf10-1P, 11salf10-10P, 11salf13-9P, 11salf13-14P).

La deuxième forme est probablement attribuable à une évolution minéralogique. Exceptée la perte de poids à l'air, les sites 11salf7, 11salf13 et 11salf14 ne présentent pas d'évolution particulière. Seul le lot 11salf10 semble se démarquer par des évolutions de l'aimantation allant vers un

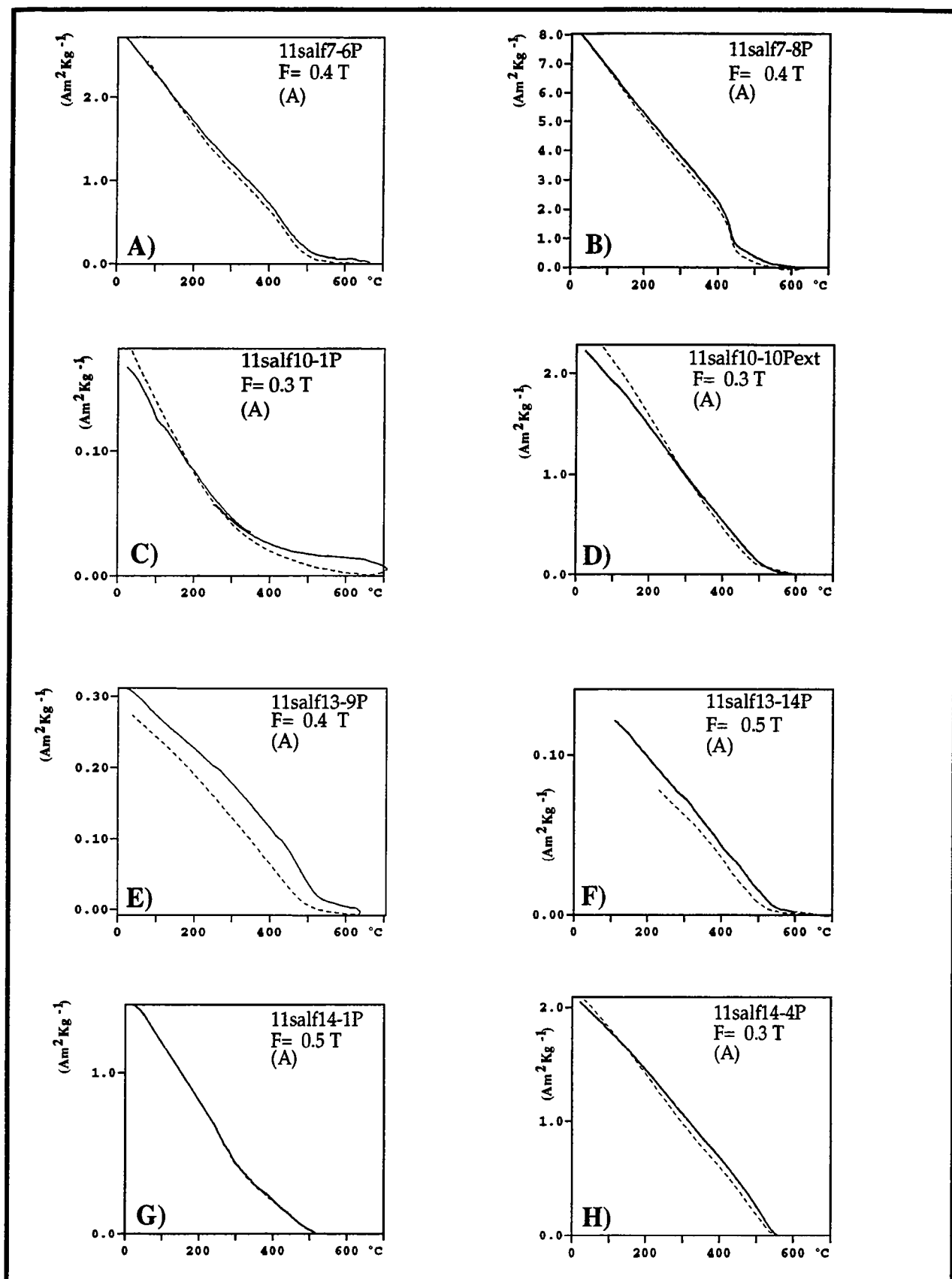


fig. IV-4 : Exemples de balance de Curie exécutées sur divers échantillons de Sallèles d'Aude. Toutes les expériences ont été réalisées en atmosphère libre (A). Les courbes de chauffés sont en trait plein et les courbes de refroidissement sont en pointillés. La force du champ utilisé est indiquée par la valeur de F.

- A et B, échantillons du four 11salf7, montrant un point de Curie à 500°C et 450°C.
- C et D, échantillons du four 11salf10. Le premier ne permet pas de déterminer le point de Curie, le second est un extrait réalisé à partir de séparation des grains magnétiques avec un aimant (point de curie à 500°C).
- E et F, du four 11salf13, montrant un point de Curie à 520°C et 550°C.
- G et H, du four 11salf14, montrant un point de Curie à 320°C et 520°C pour le premier et 550°C pour le second.

affaiblissement du moment magnétique. Mais nous remarquons *a contrario* que l'extrait 11salf10-10Pext présente en fin de refroidissement une aimantation légèrement supérieure à celle du début de chauffe.

échantillon	$J_{50^{\circ}\text{C}}$	B	$T_M-T_m$	$E_t$	$T_c$	$E_{50^{\circ}\text{C}}$
	$\text{Am}^2/\text{Kg}$	T	$^{\circ}\text{C}-^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$	%
11salf7-1P	4,8	0.2			550	- 10
11salf7-6P	2.5	0.4			500	+3
11salf7-8P	7.7	0.4			450	0
11salf7-14P	1.0	0.4			?	+2
11salf10-1P	1.64	0.3	350 - 250	-20	?	-28
11salf10-7P	0.05	0.6	350 - 250	-30	?	-70
11salf10-10P	0.21	0.4	350 - 250	-2	?	-25
extrait : 10Pext	2.11	0.3	350 - 250	-2	520	+12
11salf10-12P	0.07	0.5	350 - 250	-25	?	-60
11salf13-9P	0.30	0.4			520	-18
11salf13-14P	$\approx 1.36$	0.5			550	$\approx -13$
11salf14-1P	1.38	0.5			325, 550	
11salf14-4P	1.95	0.3			550	+2.5

Tableau IV-5 : caractéristiques des balances de Curie. échantillon, numéro d'échantillon,  $J_{50^{\circ}\text{C}}$ , aimantation à saturation mesurée à  $50^{\circ}\text{C}$ , B, intensité du champ,  $T_M-T_m$ , températures maximale et minimale du test d'évolution partielle,  $E_t$ , évolution du moment magnétique entre la première chauffe ( $J_{sc}$ ) et le passage à la même température lors du test ( $J_{st}$ ), à  $250^{\circ}\text{C}$ ,  $E_t=(J_{st}-J_{sc})/J_{sc}$ ,  $T_c$ , température de Curie, ?, température indéterminable,  $E_{50^{\circ}\text{C}}$ , évolution du moment magnétique entre la chauffe ( $J_{sc}$ ) et le refroidissement ( $J_{sr}$ ), à  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $E_{50^{\circ}\text{C}}=(J_{sr}-J_{sc})/J_{sc}$  (voir fig. III-14).

Nous retrouvons dans l'ensemble les mêmes caractéristiques d'un lot à l'autre. Les points de Curie, entre  $500$  et  $570^{\circ}\text{C}$ , peuvent être attribuées à des compositions de type (titano)magnétite de faible concentration en titane. Deux autres valeurs, vers  $325^{\circ}\text{C}$  et  $450^{\circ}\text{C}$ , sont aussi mises en évidence. Un seul de ces essais présente une courbe avec deux points de Curie (11salf14-1P). L'interprétation de ces deux autres valeurs est plus difficile. On sait que les titanomagnétites voient leur température de Curie varier en fonction du taux de substitution du fer par le titane. On peut supposer que nos échantillons contiennent des titanomagnétites avec des degrés divers de concentration en titane. La présence de titanomaghémite serait aussi possible. Mais les minéraux tels les titanomagnétites riches en titane, ou les titanomaghémites, ont habituellement nettement tendance à évoluer lorsqu'ils sont chauffés (Lowrie, 1990), à plus forte raison à l'air. Ce n'est pas particulièrement le cas ici. Nous sommes justement en présence d'une composition qui présente une réelle stabilité magnétique avec l'élévation de température. Cette stabilité vis à vis des chauffes est très intéressante car elle est la condition minimale de toute expérience de paléointensité.

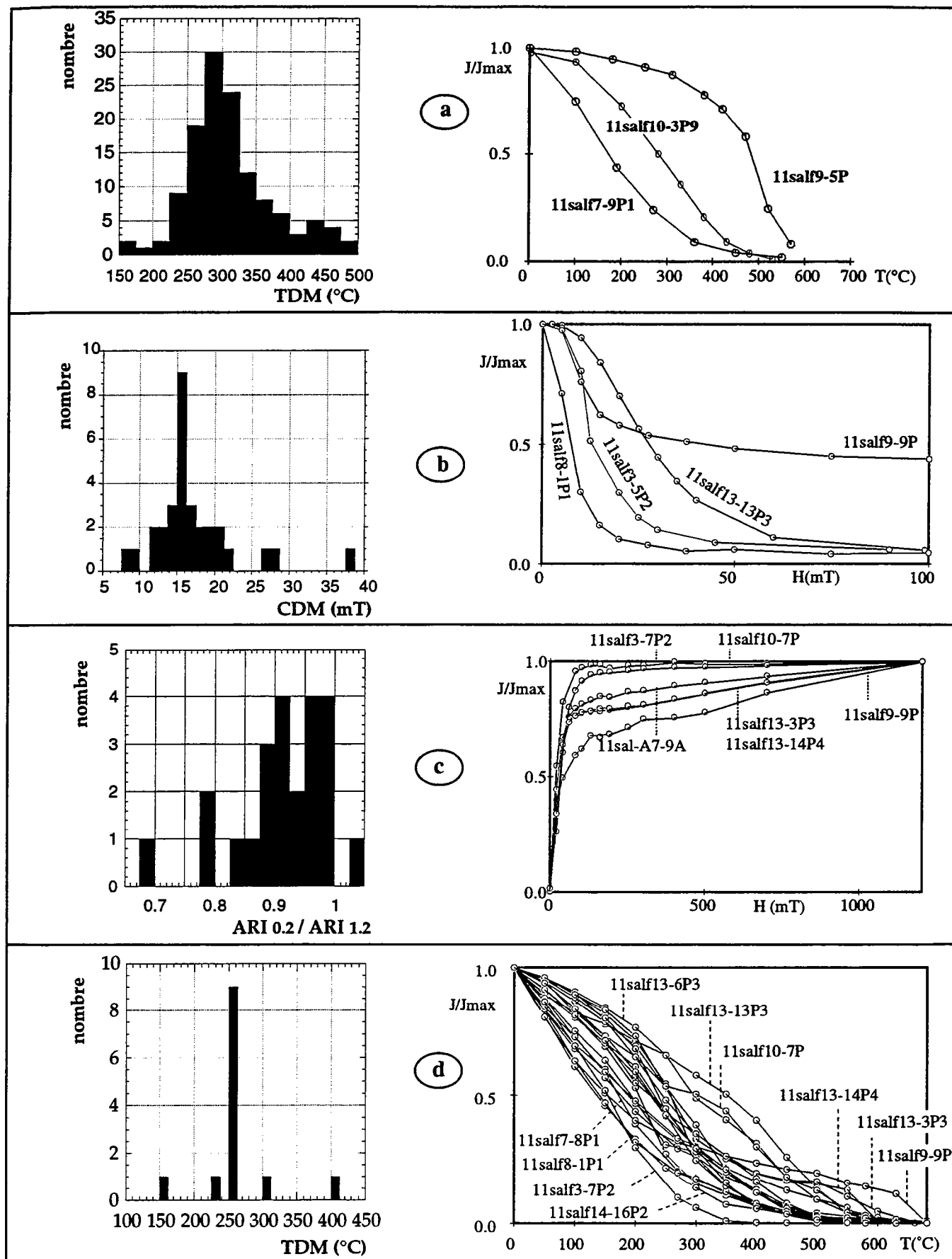


fig. IV-5 : exemples de comportement magnétique et thermomagnétique des échantillons (courbes normalisées).  
 - a : désaimantation thermique de l'ARN, à gauche histogramme des TDM, à droite, courbes de désaimantation des échantillons les plus remarquables,  
 - b : désaimantation par champ alternatif de l'ARN, à gauche, histogramme des CDM, à droite, courbes de désaimantation des échantillons les plus remarquables,  
 - c : acquisition d'ARI, à gauche histogramme des rapports (ARI à 0.2mT/ARI à 1.2mT), à droite, courbes d'acquisition des échantillons caractéristiques,  
 - d : désaimantation thermique de l'ARI. L'histogramme des TDM des ARI est présenté à titre indicatif, à cause de la faiblesse du nombre des échantillons.



## Désaimantation Thermique des ARN

La désaimantation est très rapide jusqu'à 400°C, les échantillons perdant 50% de leur aimantation pour des températures (TDM) comprises entre 250 et 385°C, 290°C en moyenne (fig. IV-5-a). La désaimantation est souvent totale à 580°C (lot 11salf7, 11salf10-3P9, 11salf13-12P4, 11salf13-14P5, lot 11salf14), mais certains échantillons ne se désaimantent parfois que pour des températures supérieures à 600°C, (11salf10-1P3, 11salf10-10P4, 11salf13-6P4, 11salf13-13P4). Ces hautes températures n'avaient pas été mises en évidence par les balances de Curie (11salf10-10Pex et 11salf10-4P).

## Désaimantation par champ alternatif

Excepté pour l'échantillon 11salf9-9P, toutes les courbes présentent des désaimantations rapides par CA (fig. IV-5-b). Le champ de désaimantation moyenne (CDM), est situé entre 10 et 30 mT, 16 mT en moyenne et il ne reste à 100mT plus que 20 à 10% de l'aimantation initiale. 11salf9-9P a un CDM égal à 38mT et il lui reste encore 44% d'ARN après application d'un champ de 100 mT.

11salf9-9P n'est pas représentatif des échantillons utilisés en paléointensité car sa valeur d'ARN est trop faible pour nos critères de sélection.

## Acquisition d'ARI

Les acquisitions d'ARI (fig. IV-5-c) ont été effectuées après avoir désaimanté les échantillons par CA. Les aimantations ont été données avec un champ parallèle à l'axe z de l'échantillon (champ maximum de 1,2T). Les échantillons acquièrent une aimantation à saturation vers 10mT (11salf3-7P2 par exemple), soit entre 10 et 20 mT, ou au delà de 1,2T (11salf13-3P3 par exemple).

## Désaimantation thermique des ARI

Sur 21 échantillons, 18 perdent 50% de leur aimantation pour des températures comprises entre 135 et 270°C (fig. IV-5-d). Les trois échantillons restant ont leur TDM comprises entre 295 et 355°C (11salf10-7P, 11salf13-6P3, 11salf13-13P3). La désaimantation totale se fait majoritairement vers 580°C mais quelques échantillons montrent aussi la présence d'aimantation au delà de cette température (11salf9-9P et 11salf13-3P3 pour les exemples les plus nets).

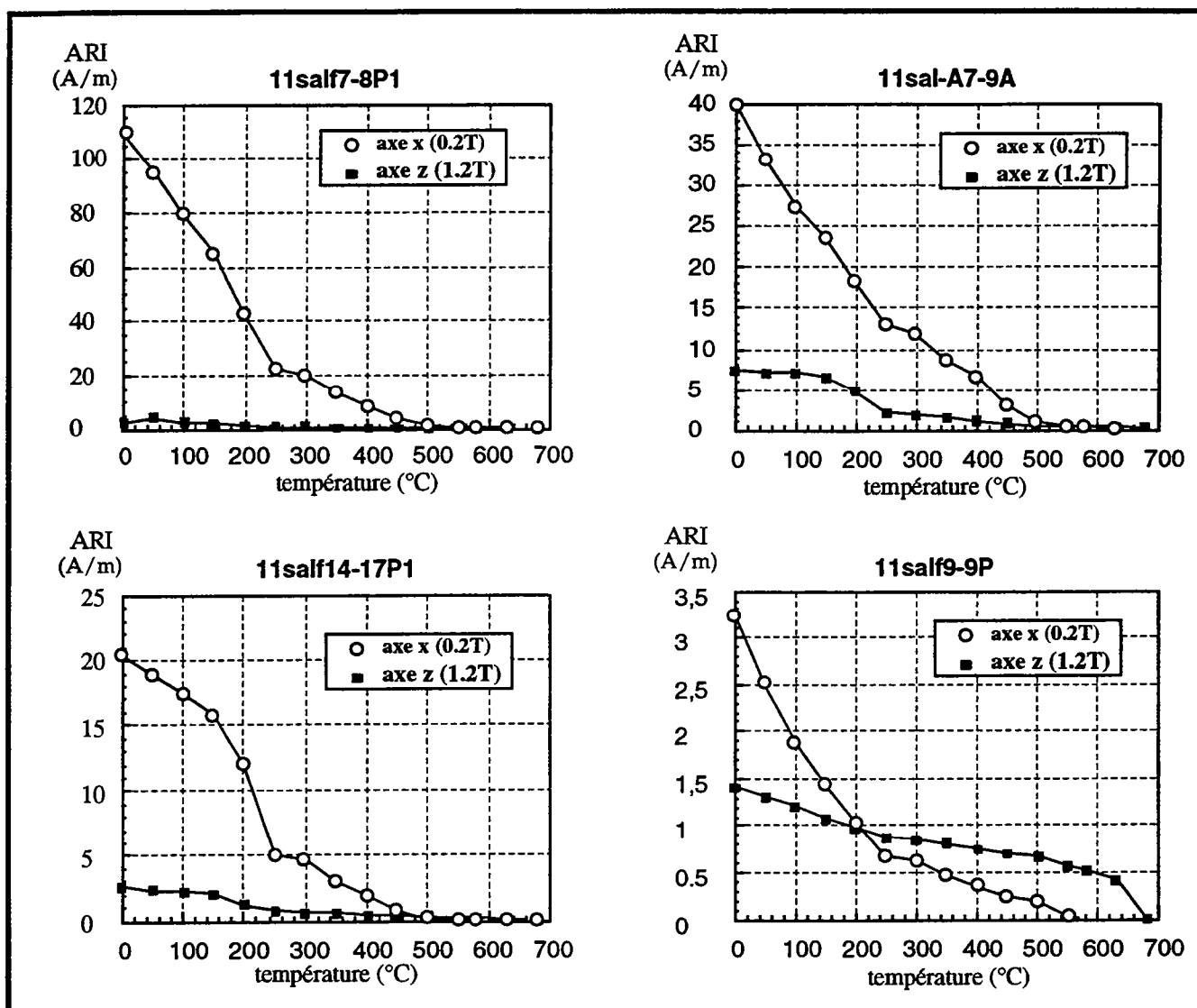


fig. IV-6 : désaimantation thermique d'ARI croisée. Echantillons les plus caractéristiques. L'ARI a d'abord été acquise dans un champ de 1.2T, selon l'axe z de l'échantillon, puis dans un champ de 0.2T selon l'axe x.

## Désaimantation thermique des ARI croisées

Ces ARI, acquises sur treize échantillons, ont été données en deux temps : une première aimantation est acquise dans un champ de 1.2 T, selon l'axe z de l'échantillon. La seconde aimantation est donnée dans un champ de 0.2 T selon l'axe x. Elle concerne les minéraux magnétiques dont l'aimantation est saturée pour des champs compris entre 0 et 0.2T. L'aimantation selon l'axe z concerne les minéraux dont l'aimantation est saturée entre 0.2 et 1.2T.

Pour de nombreux échantillons l'aimantation selon l'axe x présente la particularité de se désaimanter rapidement jusqu'à 250°C où se situe un point d'inflexion (fig. IV-6). L'aimantation qui reste alors selon cet axe est totalement désaimantée vers 580°C. Avec une importance moindre cette inflexion se retrouve aussi sur les courbes de désaimantation selon l'axe z. Lorsque l'hématite n'est pas visible entre 580 et 680°C la désaimantation selon z apparaît achevée à 250°C (11salf7-8P1, 11salf3-7PA, 11salf13-12P3).

## Analyse chimique de deux échantillons

Une analyse par fluorescence X, des éléments majeurs, a été effectuée pour les échantillons 11salf7-6P1 et 11salf13-12P, au laboratoire de Spectrométrie de Fluorescence X de Rennes I (tableau IV-6). Cette analyse concerne l'ensemble de l'échantillon et non seulement les grains magnétiques. La teneur en oxydes de fer est d'environ 5%, et on remarque la présence de 17%, en moyenne, de calcite. Ces caractéristiques sont retrouvées dans d'autres analyses de fluorescence X, réalisées sur de la céramique produite à Sallèles (communication personnelle de F. Laubenheimer). Nous pouvons noter l'homogénéité de la composition de ces deux échantillons qui proviennent de fours (d'âges) différents, homogénéité qui traduit l'unicité géographique et géologique de l'approvisionnement en matière argileuse.

échantillon	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.	Total
11salf13-12P	53.23	13.66	5.11	0.09	4.79	16.57	0.44	2.82	0.61	0.16	2.31	99.79
11salf7-6P1	53.29	11.37	4.10	0.07	4.02	17.59	0.82	2.12	0.57	0.15	5.69	99.79

Tableau IV-6 : analyse par fluorescence X des principaux composants de deux échantillons de Sallèles-d'Aude. échantillon, numéro d'échantillon, P.F. : perte au feu.

Des analyses par diffractométrie de rayons X ont aussi été effectuées sur des échantillons modernes d'adobe ou cuits à 1000°C, fabriqués à partir d'argile provenant de Sallèles (série S93). La disparition des minéraux argileux a été mise en évidence, mais du fait de la faible teneur en oxydes de fer, avant ou après cuisson, les composés de fer ne sont pas identifiables.

## Conclusions sur la minéralogie magnétique des échantillons de Sallèles

L'homogénéité des argiles cuites du site de Sallèles-d'Aude est bien marquée par la similitude des courbes expérimentales (CA, ARI, ARN et ARI/DT) et analyse chimique. Au moins quatre types de minéraux magnétiques ont été répertoriés :

- de la magnétite (saturant en dessous de 300mT, se désaimantant vers 580°C),
- et/ou de la titanomagnétite riche en fer (températures de Curie élevée),
- parfois de l'hématite (non saturée pour un champ maximum de 1.2T, se désaimantant vers 680°C),
- et enfin, pour une contribution très importante, par un minéral dont l'aimantation isotherme atteint la saturation en dessous de 300mT, comme la magnétite, mais dont la température de blocage se situe vers 250°C.

Ce dernier composant pourrait être assimilé à des titanomagnétites à forte concentration en titane, ou bien à de la maghémite. Pourtant, comme nous l'avons déjà dit, ces minéraux sont habituellement instables et voient leur composition évoluer lorsqu'ils sont chauffés (par exemple la maghémite se transforme en hématite au delà de 350°C). Cette propriété est d'ailleurs citée par Lowrie (1990) comme critère de reconnaissance. Nos échantillons ne présentent pas d'évolution notable de la minéralogie magnétique, que ce soit lors des essais de balance de Curie, à l'air, ou lors des déterminations de paléointensité. Stacey & Banerjee (1974) ont relaté des cas d'expériences où des maghémites se sont révélées stables à la chauffe car elles contenaient des impuretés de type sodium, aluminium ou magnésium. Longworth & Tite (1977) ont effectué des études de spectre Mössbauer du fer pour des extraits de sols bruts ou de sols chauffés, suite à la présence de foyer ou bien par la cuisson expérimentale dans un mélange d'azote et d'air en laboratoire. Grâce à ces analyses, ceux-ci ont trouvé que la principale composante ferromagnétique de leurs échantillons cuits était de la maghémite. Et celle-ci présente la particularité d'être impure, une des impuretés pouvant être de l'aluminium par exemple.

Ce résultat nous intéresse car un rapprochement peut être fait entre les conditions expérimentales de Longworth & Tite et les nôtres :

- le matériel de base est de l'argile,
- celle-ci est cuite dans une atmosphère libre, plus ou moins réductrice.

Nous pouvons donc nous attendre à ce que le résultat des réactions chimiques au sein de nos terres cuites ne soit peut être pas identique , mais très proche de celui -ci.

En conclusion, il se pourrait que ce minéral ferromagnétique soit du type maghémite, maghémite qui se présenterait "dopée" par la présence d'impuretés, lesquelles assureraient la stabilité durant la chauffe de la composition magnétique.

## IV-3-2 Essais de caractérisation de la taille des grains

Nous avons tenté de caractériser la taille des grains magnétiques, à l'aide d'expériences de désaimantation par champ alternatif d'ARN et ARI, ainsi que par des mesures de cycles d'hystérésis.

### Comparaison des courbes de désaimantation par champ alternatif

Lowrie et Fuller (1971), Dunlop (1983), ont réalisé diverses expériences de désaimantation par champ alternatif d'aimantations acquises en champ faible (ATR, ARA) et d'aimantations acquises en champ fort (ARI); ceci à partir d'échantillons à grains de magnétite ou titanomagnétite.

L'allure des courbes de désaimantation varie en fonction de la taille moyenne des grains magnétiques :

- lorsque la minéralogie magnétique est essentiellement constituée de grains de comportement polydomaine, l'aimantation acquise en champ faible est plus rapidement désaimantée par champ alternatif que l'aimantation acquise en champ fort,
- c'est l'inverse pour une aimantation portée par des grains majoritairement monodomaines,
- lorsque il y a mélange de grains de tailles similaires, les courbes de désaimantation sont proches les unes des autres,
- s'il s'agit d'une répartition bimodale, avec un net contraste des tailles, les courbes sont largement séparées, avec une courbe de désaimantation de l'ARI de type polydomaine (désaimantation rapide), et une courbe de désaimantation de l'ATR de type monodomaine (plus résistante).

échantillon	CDM-N (mT)	CDM-I (mT)	$\delta$ CDM CDM-N	Hc (mT)	$\frac{H_r}{H_c}$	$\frac{J_r}{J_s}$
11salf7-3P0	15.0	9.9	0.34			
11salf7-3P1				4.3	5.2	0.099
11salf7-10P0				4.2	2.1	0.077
11salf7-14P3	11.6	7.8	0.32			
11salf10-7P	21.3	17.0	0.20			
11salf10-10P	14.6	9.9	0.32			
11salf13-12P3	14.6	7.8	0.46			
11salf13-13P3	27.7	15.7	0.43			
11salf13-9P1				2.9	9.1	
11salf14-16P2	9.3	7.4	0.20			
11salf14-17P1	19.3	10.1	0.47			

Tableau IV-7 : désaimantations par champ alternatif des ATR et des ARI et caractéristiques d'hystérésis (cf. fig. IV-8 et fig. III-10). échantillon, numéro d'échantillon, CDM-N, valeur du champ de désaimantation moyenne de l'ATR, CDM-I, valeur du champ de désaimantation moyenne de l'ARI,  $\delta$ CDM / CDM-N, rapport de la différence entre les deux valeurs de CDM, normalisé par le CDM de l'ATR, Hc valeur du champ coercitif,  $H_r/H_c$  rapport entre champ coercitif rémanent et champ coercitif,  $J_r/J_s$ , rapport entre ARI et aimantation à saturation.

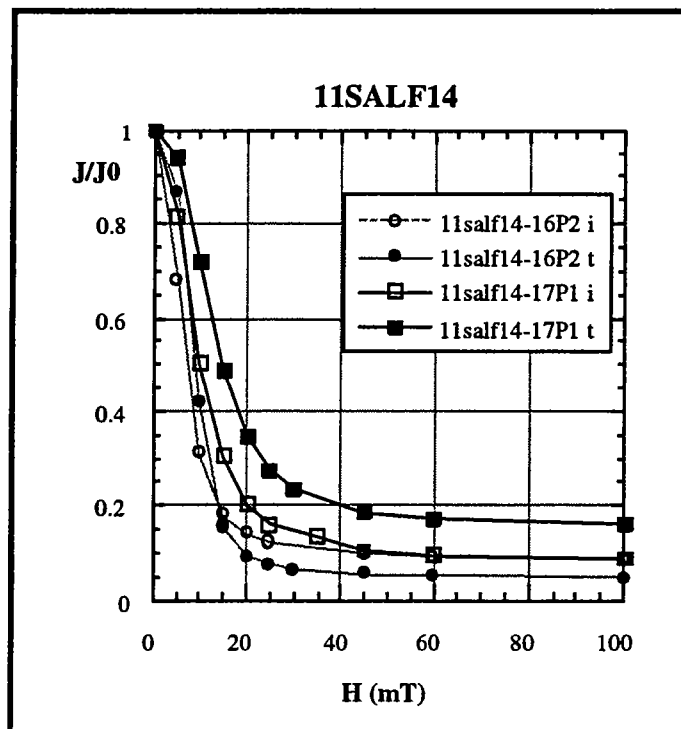


fig. IV-7 : comparaison des courbes de désaimantation par champ alternatif des ARI (i) et des ATR (t).

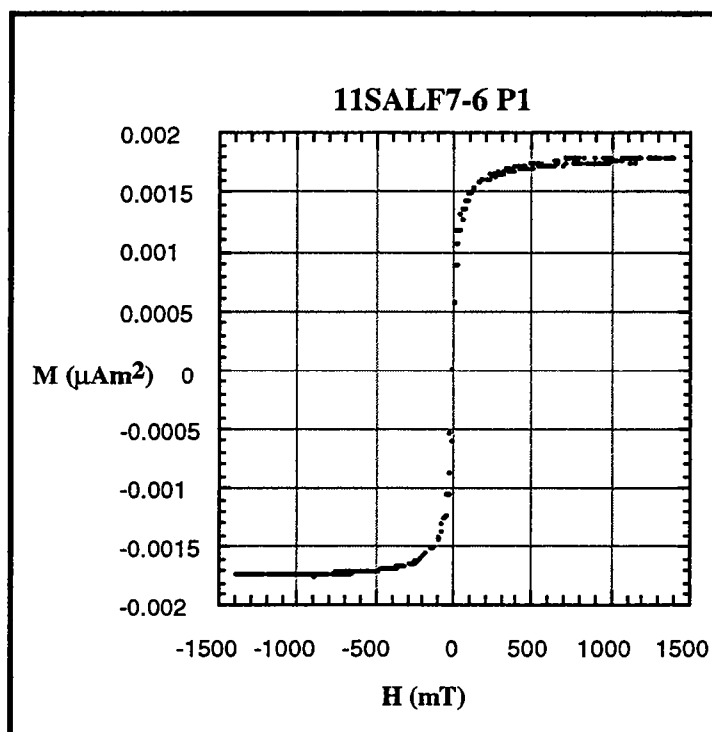


fig. IV-8 : courbe d'hystérésis de l'échantillon 11salf7-6P1, après correction du paramagnétisme

Tous nos échantillons présentent une désaimantation rapide avec, vers des valeurs de 20 mT du CA, une inflexion et une désaimantation tendant à se stabiliser (fig. IV-7). Les courbes d'ATR et d'ARI restent très proches les unes des autres. Excepté pour l'échantillon 11salf14-16P2, toutes les figures montrent des ATR plus résistantes au CA que les ARI. L'échantillon 11salf14-16P2 présente une ATR plus résistante jusqu'à 15mT. Ensuite la courbe d'ARI est supérieure (tableau IV-7).

## Cycles d'hystérésis

Les expériences de mesure de cycles d'hystérésis permettent de calculer le rapport  $R_I = J_s/J_s$  et  $R_H = H_r/H_c$  des échantillons, rapports pouvant être des indicateurs de la taille des grains de magnétite ou titanomagnétite comme nous l'avons précédemment exposé au chapitre III.

Quatre cycles d'hystérésis ont été effectués. Un sur l'échantillon 11salf7-6P1, au Laboratoire de Géologie de l'Environnement de Marseille, et trois au Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés (11salf7-3P1, 11salf7-10P0, 11salf13-9P1).

Parmi ces quatre échantillons, 11salf13-9P1 se singularise car sa faible ARN (0.4 A/m) n'est pas du tout représentative du lot d'où il est extrait (2.3 A/m en moyenne).

Pour les échantillons de la série 11salf7-6P la désaimantation totale est à 550°C, avec un TDM de 230°C. Ils acquièrent une aimantation à saturation vers 200mT. Ces caractéristiques laissent donc penser à la présence de magnétite, mais celle-ci, vu le TDM, est probablement mélangée avec un deuxième composant, dont l'aimantation se sature rapidement elle aussi, mais de températures de blocage moins élevées.

La courbe d'hystérésis de 11salf7-6P1, après correction de paramagnétisme, présente deux fourches saturantes à partir de 250mT, et une valeur nulle de champ coercitif (fig. IV-8).

Les cycles d'hystérésis des trois autres échantillons sont aussi caractérisés par une courbe fermée avec une montée en champ recouverte par la descente, figure quasi identique à celle obtenue pour l'échantillon 11salf7-6P1.

## Conclusions sur la taille des grains

Toutes les références citées précédemment concernent des travaux réalisés à partir d'échantillons de composition en magnétite et titanomagnétite bien définie (entre autre la titanomagnétite de type TM60).

Nos échantillons contiennent en outre des minéraux qui sont peut-être de la maghémite (apparemment présente dans tous ces échantillons), ou de l'hématite (dans 11salf14 par exemple).

Comme aucun échantillon ne présente de composition unique, et identique aux expériences précitées, notre interprétation reste donc limitée.

Nous pouvons toutefois faire les remarques suivantes :

- les courbes de désaimantation par CA des ATR et ARI sont rapprochées les unes des autres. Dunlop en 1983 fait allusion à un comportement similaire, lequel est attribué, dans ses expériences, à des mélanges de grains de tailles diverses. Peut-être en est-il de même ici, la variation de la composition pouvant s'accompagner d'une variation de la taille des grains,

- Les valeurs de  $H_c$ ,  $R_I$  et  $R_H$  calculées à partir des cycles d'hystérésis sont très variables et ne permettent pas de définir une catégorie de grain en particulier.

Dans leurs travaux sur des poteries du Pérou, Yang & al (1993b) ont obtenu des cycles d'hystérésis d'allure identique aux nôtres. Ce comportement est attribué à une composition de magnétite dont la taille des grains varie entre polydomaines et superparamagnétiques.

Pick & Tauxe (1994) ont observé des comportements similaires dans des verres basaltiques. Après diverses simulations l'hypothèse d'une contribution de grains suffisamment petits pour être superparamagnétiques a été retenue. : les caractéristiques d'hystérésis sont alors dominées par ces grains et les cycles d'hystérésis ressemblent à celui de 11salf7-6P1.

Les études de spectre Mössbauer du fer dans les céramiques révèlent souvent l'existence de grains superparamagnétiques, qu'ils soient d'hématite ou de maghémite (Longworth et Tite, 1977, Simopoulos & al., 1975). Bien que la cuisson à haute température (au delà de 900°C) semble favoriser l'accroissement de la taille des grains magnétiques (Simopoulos & al., 1975, Kostikas & al, 1974) des tailles de grains estimées autour de 160Å seraient toujours observables.

Des essais d'observation des grains magnétiques de nos échantillons ont été effectués à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Ces essais n'ont donné aucun résultat si ce n'est qu'aucun grain magnétique de taille égale ou supérieure à 20-30µ n'a été observé (conversation personnelle avec P. Roperch).

Il semble donc que la répartition de la taille des grains magnétiques constitutifs de nos échantillons puisse être modélisée par une association de grains superparamagnétiques et de grains de taille suffisamment grande pour porter une aimantation rémanente.

#### **IV-4 Détermination des paléointensités**

##### **Choix de la méthode**

Nous avons déjà expliqué les raisons du choix de la méthode Thellier-Thellier 1959 dans le chapitre II et III.

Les analyses ont été effectuées en majorité au laboratoire de Rennes. Deux lots, 11salf7 et 11salf13, ont été étudiés au laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés.



## Description du processus expérimental

Les conditions de mise en application de la méthode ont déjà été décrites au chapitre III.

Excepté pour l'étude du lot 11salf10 où il était fixé à 60  $\mu$ T, le champ utilisé par la suite en laboratoire a été fixé à 50  $\mu$ T.

## Choix des étapes de température

Nous avons fait appel aux diagrammes de désaimantation thermique de l'ARN pour calculer les températures moyennes permettant d'obtenir des pas réguliers de désaimantation de l'ARN (entre 5 et 9 étapes entre 20°C et 570°C).

Afin d'éviter tout effet d'aimantation secondaire de type visqueuse, la première étape de chauffe a été effectuée à 100°C. Pour les échantillons utilisés à Saint-Maur (première série de 11salf7, série 11salf13) une première chauffe à 200°C a été préférée consécutivement à la présence d'échantillons d'un autre site, porteurs d'aimantation secondaire dans les basses températures.

Les tests d'ATR partielle sont en moyenne effectués toutes les 3 étapes, avec aussi des tests de contrôle de la sixième à la première étape.

## Calcul de l'anisotropie d'ATR

Les raisons qui nous amènent à calculer l'anisotropie d'ATR de nos échantillons ont déjà été développées dans le chapitre II, et ont été reprises pour l'aspect méthodologique dans le chapitre III (les résultats sont regroupés en annexe du chapitre II, pour chaque échantillon).

Nous nous bornerons ici à présenter un résumé des caractéristiques des rapports entre valeurs propre maximale et minimale (tableaux IV-8).

lot	rapport K1/K3 minimal	rapport K1/K3 maximal du lot	valeur moyenne par lots
11sal-a7	1.15	1.52	$1.31 \pm 0.06$
11salf3	1.27	1.67	$1.44 \pm 0.06$
11salf7	1.02	1.88	$1.33 \pm 0.11$
11salf8	1.10	1.50	$1.19 \pm 0.07$
11salf9	1.11	1.50	$1.25 \pm 0.07$
11salf10	1.08	1.37	$1.20 \pm 0.05$
11salf12	1.15	1.50	$1.31 \pm 0.06$
11salf13	1.06	1.73	$1.41 \pm 0.11$
11salf14	1.03	1.82	$1.40 \pm 0.12$
11salf15	1.11	1.59	$1.33 \pm 0.10$

Tableau IV-8 : résumé des caractéristiques des rapports K1/K3 des tenseurs d'anisotropie d'ATR des divers lots.

Comme nous pouvons le voir, ces rapports sont loin d'être négligeables, aussi avons nous appliqué systématiquement la correction d'anisotropie d'ATR.

### Effet de la vitesse de refroidissement

Cet effet a été corrigé dans nos estimations en simulant des refroidissements lents au laboratoire et en démarrant à des températures égales ou supérieures à celles utilisées pour le calcul de l'anisotropie.

La correction à apporter à l'ATR a d'abord été calculée à partir du gain moyen établi sur un groupe d'échantillons sélectionnés uniquement pour ce propos. La valeur obtenue a été ensuite appliquée uniformément à tout le lot. Il s'agit là d'une procédure appliquée à 11salf10 et 11salf14.

Par la suite le gain a été calculé et la correction appliquée pour chaque échantillon à partir duquel l'intensité est déterminée.

Quelques résultats représentatifs sont exposés dans le tableau IV-9 suivant et tous sont présentés individuellement en annexe du chapitre II.

Du fait du refroidissement très lent de l'ensemble tube et porte-échantillons de Saint-Maur (entre 6 et 7H pour passer de 450 à 30°C), les intensités calculées à partir de ces mesures n'ont pas été corrigées de cet effet.

lot	gain minimal du lot	gain maximal du lot	moyenne des gains du lot (%)	température (°C)
11sal-a7	-2.8 %	4.4 %	$0.5 \pm 1.6$	360
11salf3	0.5 %	9.3 %	$1.7 \pm 1.3$	360
11salf7	1.2 %	5.8 %	$1.7 \pm 0.3$	360
11salf8	-7.8 %	3.1 %	$-0.9 \pm 2.4$	430
11salf9	0.0 %	9.1 %	$2.9 \pm 1.8$	420
11salf10	-2.5 %	3.5 %	$0.8 \pm 1.3$	350
11salf12	-2.4%	1.4 %	$0.2 \pm 0.6$	450
11salf13	-----	-----	-----	-----
11salf14	0.4 %	3.6 %	$2.2 \pm 1.1$	500
11salf15	-0.3 %	5.1 %	$0.7 \pm 0.8$	360

Tableau IV-9 : résumé des gains d'ATR, entre refroidissement lent et rapide, pour les différents lots. Lot 11salf7 : deuxième série mesurée à Rennes.

La valeur moyenne des gains, tous lots confondus, est égale à  $2.1 \pm 0.6$  %, ce qui est faible. Mais les valeurs individuelles varient de -8% (11salf8-3Pa') à +9.5% (11salf3-9P). Les corrections sont donc appliquées à cause des différences pouvant exister entre échantillons.

## IV-5 Résultats et commentaires

Tous ces résultats sont regroupés dans le tableau IV-10.

### Analyse des résultats

Sur 10 lots, 130 échantillons ont été utilisés, et 14 d'entre eux ont été rejetés par la suite, soit un taux de "réussite" de 90 % environ.

Les résultats sont présentés dans le diagramme ARN-ATR (diagramme d'Arai). La sélection des points se fait en fonction de la linéarité de l'alignement de ces derniers et des critères suivants :

- les tests d'ATR partielle (rapportée à l'ATR totale ou maximale acquise) doivent montrer une évolution inférieure à 5%,
- les échantillons dont le diagramme de Zijderverld présente plusieurs aimantations sont rejetés pour le calcul de l'intensité moyenne du lot.

Les segments calculés pour des valeurs inférieures à 45% d'ARN désaimantée ( $f < 45\%$ ) sont rejetés.

Par contre le nombre minimal de points utilisés ( $n$ ) est de 5. Ce nombre a été abaissé à 4 pour le lot 11sal-A7 car le nombre total d'étapes utilisées est faible (5, entre 20 à 450°C).

Pour les échantillons concernés, ces 4 points représentent un intervalle contenant entre 55 et 83% de l'intensité de l'ARN. Ces résultats ont été conservés car les valeurs d'intensités obtenues sont similaires à celles calculées pour les autres échantillons du lot.

L'évolution de la susceptibilité, mesurée à 20°C, avec la température peut être indicative d'une évolution de la minéralogie magnétique sans toutefois qu'il soit possible de distinguer entre grains ferromagnétiques, diamagnétiques ou paramagnétiques. Cette indication est donc relative et utilisée en tant que telle. La susceptibilité des échantillons ne présente pas d'évolution notable.

La pente de la droite est calculée par la méthode des moindres carrés et les coefficients statistiques ( $f$ , portion d'ARN utilisée,  $g$ , facteur lié à la distance entre deux points successifs), décrits par Coe (1978) et Prévot & al. (1985), sont utilisés afin de permettre une sélection "objective" des diagrammes. Le facteur de qualité  $q$  ( $q = fg/s$ ,  $s$  erreur sur la pente) est calculé selon Coe (1978), et le facteur de pondération  $w$  ( $w = fg/s$ ), établi parfois pour un nombre de points faibles (inférieur à 4), selon Prévot & al. (1985).

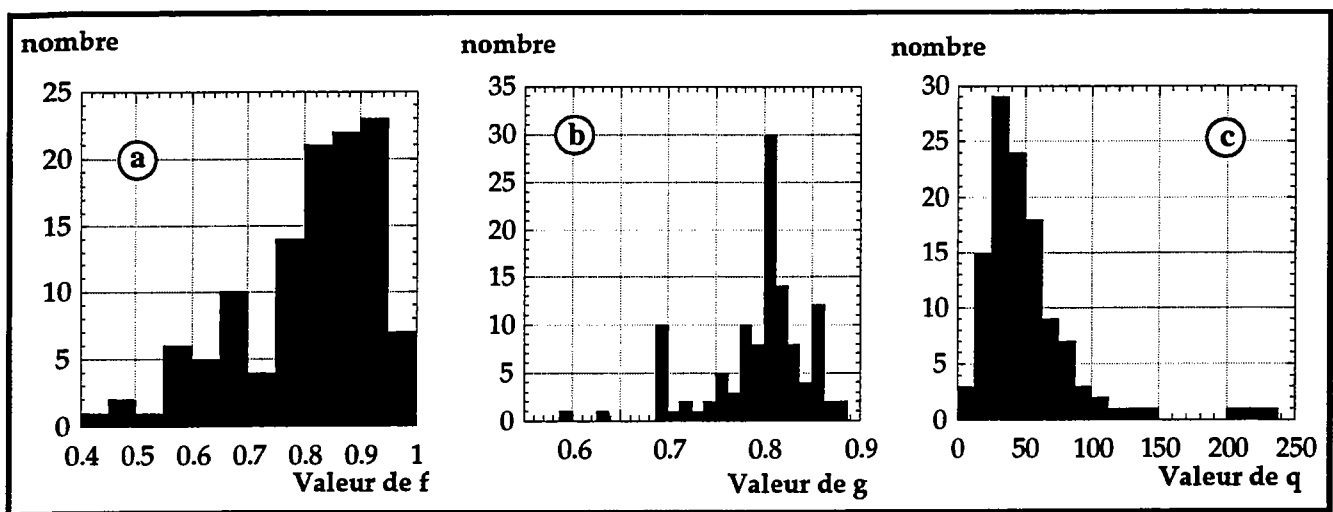


fig. IV-9 : distribution des valeurs utilisées pour quantifier la qualité des déterminations d'archéointensité. a, fraction d'ARN  $f$ , b, facteur distance entre les points  $g$ , c, facteur de qualité  $q$ .

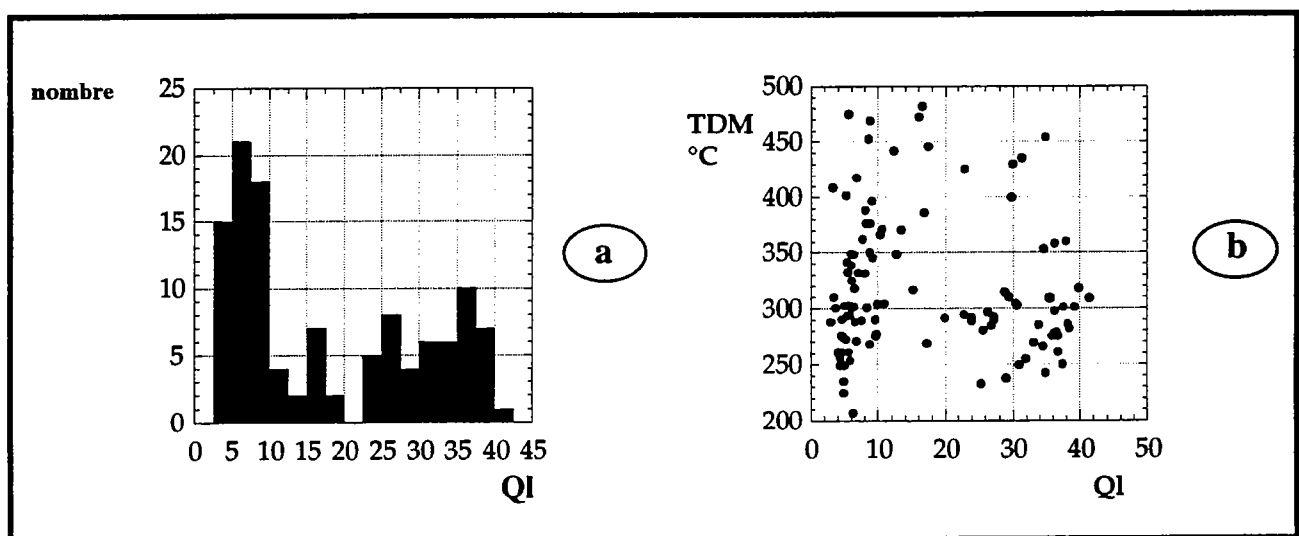


fig. IV-10: (a) distribution des valeurs de QL, (b) relation entre QL et TDM.

La figure IV-9-a représente l'histogramme de la valeur  $f$ . Cet histogramme s'étale de 40% à 100%. La majorité des valeurs sont situées autour 75 à 90%.

Le facteur  $g$  décroît théoriquement de 1 à 0 au fur et à mesure que l'espacement entre deux points successifs augmente. La valeur moyenne de  $g$  est élevée, centrée sur 0,8 (fig. IV-9b).

La valeur de  $q$  varie de 9 à 230, majoritairement concentrée entre 10 et 90 (fig. IV-9-c). Les valeurs élevées des facteurs calculés pour Sallèles sont donc normalement les signes que les paléointensités sont estimées dans de bonnes conditions.

Les valeurs du rapport de Koenigsberger au laboratoire ( $QI$ , selon Prévot & al., 1985) se répartissent selon deux modes, le premier centré entre 0 et 20, et le second entre 20 et 40 (fig. IV-10-a). Mankinen & al. (1985) précisent que le rapport  $QI$ , calculé dans le cas d'une composition unique, est seulement dépendant de la taille des grains. Par exemple, dans le contexte d'une minéralogie de magnétite un rapport de 0.5 correspond à des grains de type polydomaine. Pour les grains monodomaines le rapport sera supérieur (Stacey, 1967).

Nous ne pouvons pas utiliser ce facteur pour caractériser nos échantillons car, comme nous l'avons vu précédemment, l'aimantation est ici portée par plusieurs minéraux magnétiques.

L'histogramme des TDM, des ARN désaimantées durant la détermination des paléointensité, est de type monomodal, limité entre 200 et 500°C, centré sur la valeur d'environ 290°C. L'étalement des valeurs correspond à la variation de la minéralogie et fait ressortir la diversité des caractéristiques des minéraux identifiés, maghémite, (titano)magnétite, hématite. La valeur basse du mode de TDM met en évidence la présence dominante du minéral assimilé à de la maghémite "impure", qui provoque une désaimantation thermique rapide souvent constatée dans ces échantillons.

Nous avons essayé d'établir une relation entre les valeurs du TDM et les valeurs de  $QI$  (fig. IV-10-b). En fait aucun lien direct ne semble exister.

### **Remarques à propos du comportement du four 11salf7**

Le four n°7 présente une grande hétérogénéité de résultats, que les estimations aient été effectuées à St-Maur ou à Rennes.

Nous aurions pu penser que cette hétérogénéité provenait de la construction de bric et de broc ou des remaniements du four. Mais bien que ce lot présente un des  $\alpha 95$  les plus importants, les directions archéomagnétiques mesurées sont homogènes.

échantillon	ARN	$\chi$ 10 <sup>-5</sup> S	T <sub>min</sub> °C	T <sub>max</sub> °C	n	f	g	q	ccl	QL	Fe ± dF μT	R <sub>m</sub> ± k95 μT	F <sub>po</sub> μT	F <sub>Pa</sub> ± k95 μT	D <sub>ms</sub> °	I <sub>ms</sub> °	I <sub>Pa</sub> °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>-2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>-2</sup>
11SAL-A7																			
11sal-A7-15A	2.692	1177	190	450	4	0.59	0.76	17.90	0.99	5.14	58.88 ± 2.97								
11sal-A7-16A	5.258	1571	100	450	5	0.67	0.76	200.9	1.00	6.00	60.49 ± 0.46								
11sal-A7-30A	3.354	1547	190	450	4	0.68	0.78	25.75	1.00	4.75	60.43 ± 2.49								
11sal-A7-33A	5.163	1687	190	450	4	0.54	0.71	14.40	1.00	5.79	60.82 ± 3.27	61.5	60.7	64.3		59.5	64.6	10.4	10.1
11sal-A7-37A	1.675	1233	190	450	4	0.81	0.88	14.62	1.00	3.29	66.08 ± 6.45	±							
11sal-A7-42A	3.161	1383	100	450	5	0.92	0.85	34.56	0.99	4.93	61.87 ± 4.24	1.7							
11sal-A7-48A	3.962	1510	100	360	4	0.61	0.70	8.82	0.99	4.32	63.60 ± 6.12								
11sal-A7-49A	2.968	1669	190	450	4	0.83	0.85	31.33	1.00	5.29	57.63 ± 2.58								
11sal-A7-51A	3.981	1955	100	450	5	0.73	0.78	14.57	1.00	3.45	63.34 ± 7.39								
11sal-A7-24A*	3.261	1041	100	450	5	0.73	0.74	8.24	0.99	7.58	62.08 ± 3.53	60.4							
11sal-A7-25A*	2.988	1300	100	360	4	0.46	0.70	9.95	0.99	5.23	61.76 ± 5.32	±							
11sal-A7-26A*	4.731	1014	100	360	4	0.69	0.68	22.29	1.00	13.10	48.37 ± 2.04	2.5							
11SALF3																			
11salf3-1P	1.057	377	100	410	8	0.70	0.82	36.80	1.00	3.66	71.47 ± 5.60								
11salf3-2P	1.242	72	100	410	8	0.78	0.69	76.18	1.00	25.30	65.43 ± 2.32								
11salf3-4P	1.207	412	100	500	8	0.80	0.83	48.40	1.00	4.07	68.48 ± 5.69								
11salf3-5P	2.349	107	100	410	8	0.88	0.77	97.38	1.00	37.40	60.81 ± 2.12	64.4	63.6	67.5	0.2	56.1	61.5	11.4	10.6
11salf3-6P	2.239	93	100	410	8	0.69	0.81	49.81	1.00	34.60	67.13 ± 3.77	±			±	±			
11salf3-8P	4.584	249	20	410	8	0.76	0.82	65.76	1.00	29.40	62.82 ± 3.56	2.3			3.0	1.7			
11salf3-8PA	4.612	245	100	410	8	0.72	0.81	37.96	1.00	28.80	63.98 ± 4.89								
11salf3-9P	0.636	373	20	500	8	0.91	0.86	49.86	1.00	2.96	60.84 ± 6.69								
11salf3-10P	1.040	258	20	500	8	0.91	0.85	77.73	1.00	6.47	62.77 ± 4.40								
11salf3-11P	1.508	483	100	500	8	0.79	0.83	114.7	1.00	5.53	60.64 ± 2.08								
11salf3-7P : abandonné suite évolution.																			
11salf3-3P*	3.154	911	100	500	8	0.85	0.85	64.02	1.00	5.57	64.32 ± 4.02	64.4 ± 2.2		nl					

échantillon	ARN	$\chi$	Tmin	Tmax	n	f	g	q	ecl	QL	Fe $\pm$ cf	Rn $\pm$ k95	Fpo	FFa $\pm$ k95	Dms	Ims	I Pa	VDM	VADM
	A/m	10 <sup>3</sup> SI	°C	°C							$\mu$ T	$\mu$ T	$\mu$ T	$\mu$ T	°	°	°	10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
11SALF7																			
11salF7-1P0	5.713	830	20	450	6	0.84	0.76	24.52	0.99	9.17	69.18 $\pm$ 7.16								
11salF7-1P1	5.445	778	20	450	6	0.81	0.75	40.49	1.00	7.68	76.23 $\pm$ 4.60								
11salF7-2P0	11.69	1259	20	360	5	0.59	0.70	10.93	1.00	8.04	85.54 $\pm$ 9.70								
11salF7-5P0	1.025	67	20	360	5	0.85	0.72	31.61	1.00	29.00	57.06 $\pm$ 3.30								
11salF7-6P3	1.664	208	200	450	7	0.56	0.76	19.02	0.99	19.90	48.64 $\pm$ 4.39								
11salF7-6P4	2.492	219	20	450	7	0.84	0.81	39.17	0.99	27.20	55.17 $\pm$ 4.80								
11salF7-6P5	2.104	209	20	450	7	0.84	0.80	25.12	0.99	23.90	50.81 $\pm$ 6.81								
11salF7-8P0	9.210	544	20	450	7	0.90	0.82	44.45	0.99	38.40	52.30 $\pm$ 4.34	60.1	58.7	62.2	1.2	58.5	63.7	10.2	9.79
11salF7-8P2	7.323	563	20	450	7	0.91	0.81	56.32	1.00	26.80	54.82 $\pm$ 3.61	$\pm$		$\pm$	$\pm$	$\pm$			
11salF7-8P3	9.083	556	20	450	7	0.91	0.82	59.36	0.99	36.50	52.97 $\pm$ 3.33	5.0		5.0	4.3	2.3			
11salF7-8P4	6.651	569	20	450	7	0.91	0.82	62.21	1.00	25.60	53.48 $\pm$ 3.19								
11salF7-9P0	2.468	588	20	360	5	0.75	0.73	58.69	1.00	6.78	62.48 $\pm$ 1.74								
11salF7-10P1	4.886		20	360	5	0.81	0.72	25.61	1.00	17.20	53.72 $\pm$ 3.63								
11salF7-12P0	1.479	487	20	380	6	0.81	0.70	25.85	0.99	4.34	66.13 $\pm$ 5.80								
11salF7-12P1	1.654	562	200	380	5	0.45	0.79	17.38	0.99	4.58	67.51 $\pm$ 4.11								
11salF7-14P0	2.283	314	200	450	6	0.69	0.81	19.90	0.99	22.80	49.66 $\pm$ 5.59								
11salF7-14P1	2.759	324	20	450	7	0.92	0.82	49.42	0.99	23.90	51.29 $\pm$ 3.90								
11salF7-15P0	8.314	1172	20	550	7	0.99	0.78	23.77	1.00	8.11	74.56 $\pm$ 12.09								
11salF7-2P1	0.726		100	360	4	0.68	0.80	11.17	1.00	2.07	69.31 $\pm$ 6.74	60.4	4pts : rejeté						
11salF7-3P2	1.672	550	100	360	4	0.58	0.65	52.03	1.00	4.71	63.44 $\pm$ 0.92	$\pm$	4pts : rejeté						
11salF7-9P1*	1.156	613	20	360	5	0.90	0.73	88.84	1.00	2.72	66.11 $\pm$ 1.51	4.7	nl						

échantillon	ARN	$\chi$	Tmin	Tmax	n	f	g	q	ccl	QL	Fe ± dF	Rn ± k95	Fpo	FPa ± k95	Dms	Ims	IPa	VDM	VADM
	A/m	10 <sup>5</sup> SI	°C	°C							$\mu T$	$\mu T$	$\mu T$	$\mu T$	°	°	°	10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
11SALF8																			
11salF8-3P1A	8.940		100	500	6	0.80	0.70	83.20	1.00	25.30	59.76 ± 1.60								
11salF8-3P1B	9.570	651	100	500	7	0.72	0.69	57.40	1.00	17.50	72.23 ± 3.13								
11salF8-4P1	3.092	670	100	380	5	0.73	0.80	38.71	1.00	7.54	65.40 ± 2.94								
11salF8-5P1	4.846	944	100	500	7	0.90	0.84	28.93	0.99	8.85	62.92 ± 8.17	64.6	64.6	68.5	-2.8	56.5	61.9	11.6	10.8
11salF8-10P1	3.726	642	20	500	8	0.88	0.82	55.45	0.99	8.22	66.71 ± 5.22	±		±	±	±			
11salF8-10P2	2.230	507	20	430	7	0.77	0.81	35.31	0.99	6.09	67.13 ± 5.94	2.5		2.5	5.1	2.8			
11salF8-13P1	2.323	812	100	430	6	0.83	0.81	72.49	1.00	4.87	64.07 ± 2.37								
11salF8-13P2	1.981	521	20	430	7	0.89	0.81	22.61	1.00	6.23	61.69 ± 9.88								
11salF8-18P2	5.405		20	380	5	0.48	0.70	12.33	1.00	24.00	61.23 ± 5.01								
11salF8-1P2*	1.867	888	100	430	6	0.72	0.74	20.90	0.99	5.23	55.80 ± 2.93	63.2	nl						
11salF8-1P3*	1.985	894	100	430	6	0.74	0.77	59.28	1.00	4.78	58.05 ± 5.08	±	nl						
11salF8-2P2*	1.507	333	100	500	7	0.88	0.80	72.70	1.00	7.48	63.78 ± 3.72	2.5	nl						
11SALF9																			
11salF9-3P	1.011	157	20	420	9	0.70	0.83	42.11	1.00	12.70	56.56 ± 3.86								
11salF9-5P	3.445	353	100	570	9	0.91	0.79	44.25	1.00	16.60	61.32 ± 6.96								
11salF9-6P	2.447	223	100	570	9	0.98	0.79	72.67	1.00	16.10	66.62 ± 5.01								
11salF9-7P	1.117	203	100	570	9	0.97	0.85	54.98	1.00	9.07	63.51 ± 6.68								
11salF9-8P	1.412	151	100	570	9	0.97	0.81	55.87	1.00	12.30	71.08 ± 6.99								
11salF9-10P	1.439	420	100	570	9	0.85	0.86	54.46	1.00	5.55	64.59 ± 6.08								
11salF9-12P	3.613	759	100	570	9	0.80	0.87	31.26	1.00	8.59	60.52 ± 9.45	64.5	65.2	69.1	0.3	56.9	62.3	11.6	10.9
11salF9-15P	2.247	646	100	570	9	0.93	0.88	54.51	1.00	5.35	67.21 ± 7.09	±		±	±	±			
11salF9-16P	1.652	400	100	570	9	0.95	0.86	62.35	1.00	5.22	73.45 ± 6.78	2.9		2.9	3.6	2.0			
11salF9-18Pa	2.562	465	100	570	9	0.80	0.85	32.08	1.00	8.78	63.25 ± 9.36								
11salF9-18Pb	1.492	369	100	570	9	0.87	0.87	37.61	0.99	6.78	61.86 ± 8.71								
11salF9-20P*	1.472	426	100	420	6	0.86	0.82	51.78	1.00	6.70	62.64 ± 3.38	64.4 ± 2.6	nl						



échantillon	ARN	$\chi$	Tmin	Tmax	n	f	g	q	cel	QL	Fe $\pm$ dF	Rn $\pm$ k95	Fpo	Ffa $\pm$ k95	Dms	Ims	IPa	VDM	VADM
	A/m	10 <sup>5</sup> SI	°C	°C							$\mu$ T	$\mu$ T	$\mu$ T	$\mu$ T	°	°	°	10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
11SALF10																			
11salf10-1P1	3.700	760	140	420	6	0.68	0.81	34.54	0.99	9.62	63.12 $\pm$ 4.03								
11salf10-1P4	4.217	858	20	420	7	0.85	0.83	225.1	1.00	8.79	64.97 $\pm$ 1.01								
11salf10-2P0	1.723	360	140	420	6	0.77	0.82	49.51	1.00	9.72	63.17 $\pm$ 3.22								
11salf10-2P1	2.987	172	20	420	7	0.95	0.82	65.28	1.00	34.80	60.98 $\pm$ 3.64								
11salf10-3P4	3.300	204	20	420	7	0.96	0.83	97.49	1.00	31.90	62.14 $\pm$ 2.51	60.9	60.7	64.4	0.2	62.5	67.2	10.1	10.1
11salf10-3P6	2.790	174	20	420	7	0.95	0.83	81.95	1.00	30.90	62.38 $\pm$ 3.00	$\pm$		$\pm$	$\pm$	$\pm$			
11salf10-9P0	3.385	212	20	420	7	0.79	0.82	46.50	1.00	26.30	67.48 $\pm$ 4.74	1.8		1.8	3.9	1.8			
11salf10-9P1	3.372	203	20	420	7	0.77	0.82	51.75	1.00	32.70	67.44 $\pm$ 4.13								
11salf10-10P1	1.660	304	20	420	7	0.81	0.81	29.67	0.99	10.90	61.22 $\pm$ 6.76								
11salf10-10P2	2.081	281	20	420	7	0.83	0.82	81.28	1.00	15.20	60.54 $\pm$ 2.53								
11salf10-12P0	0.769	47	20	420	7	0.83	0.80	39.30	0.99	39.80	55.17 $\pm$ 4.67								
11salf10-12P3	0.751	51	140	420	6	0.56	0.69	21.19	0.99	29.80	61.82 $\pm$ 4.47								
11SALF12																			
11salf12-2P	1.413	320	100	450	6	0.75	0.79	56.08	1.00	6.33	67.07 $\pm$ 2.87								
11salf12-3P	1.664	334	100	450	6	0.79	0.78	55.99	1.00	6.98	67.36 $\pm$ 2.94								
11salf12-5P	1.530	417	100	450	6	0.77	0.80	37.20	1.00	5.44	66.45 $\pm$ 4.41								
11salf12-9P	2.774	165	100	450	6	0.86	0.78	30.69	1.00	27.20	61.92 $\pm$ 5.40								
11salf12-10P	2.970	459	100	450	6	0.80	0.80	41.08	1.00	9.89	65.94 $\pm$ 4.13	65.7	65.9	69.8	-1.6	57.8	63.0	11.6	11.0
11salf12-11P	1.315	356	100	450	6	0.70	0.81	27.65	1.00	5.90	64.30 $\pm$ 5.27	$\pm$		$\pm$	$\pm$	$\pm$			
11salf12-12P	1.501	347	100	450	6	0.78	0.78	37.50	1.00	6.33	65.93 $\pm$ 4.26	1.5		1.5	2.2	1.2			
11salf12-13P	5.109	271	100	450	6	0.64	0.69	30.32	1.00	22.90	72.33 $\pm$ 4.17								
11salf12-14P	3.852	329	100	450	6	0.86	0.79	108.8	1.00	17.30	65.94 $\pm$ 1.65								
11salf12-15P	1.375	388	100	450	6	0.82	0.80	37.09	1.00	5.72	63.83 $\pm$ 4.54								
11salf12-15P'	1.595	395	100	450	6	0.83	0.80	27.92	1.00	6.49	63.73 $\pm$ 6.04								
11salf12-18P	2.202	432	100	450	6	0.80	0.81	34.82	1.00	8.37	63.69 $\pm$ 4.72								

échantillon	ARN	$\chi$ 10 <sup>5</sup> Si	Tmin °C	Tmax °C	n	f	g	q	cd	QL	Fe ± dF μT	Rm ± k95 μT	Fpo μT	FPa ± k95 μT	Dms °	Ims °	IPa °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
11SALF13																			
11salf13-3P1	2.655	120	20	450	7	0.88	0.82	29.07	0.99	39.20	59.14 ± 7.31								
11salf13-3P2	1.815	83	20	450	7	0.86	0.81	36.88	0.99	36.70	59.71 ± 5.60								
11salf13-6P1	1.430	74	20	450	7	0.85	0.81	69.36	1.00	35.80	58.54 ± 2.93								
11salf13-6P2	1.681	79	20	450	7	0.88	0.81	45.01	0.99	39.20	59.12 ± 4.70								
11salf13-12P1	1.819	89	200	450	6	0.78	0.79	44.10	1.00	37.50	60.79 ± 3.39	61.3	61.1	64.8	-5.1	56.7	62.1	10.9	10.2
11salf13-12P2	1.687	87	20	450	7	0.97	0.82	87.26	1.00	36.70	59.77 ± 2.73	±		±	±	±			
11salf13-13P1	4.896	1178	20	450	7	0.63	0.77	22.74	0.99	5.60	68.20 ± 7.32	2.9		2.9	1.8	1.0			
11salf13-13P2	3.664	1013	200	450	6	0.57	0.76	45.18	1.00	4.66	71.90 ± 2.72								
11salf13-14P1	1.990	90	20	450	7	0.86	0.79	25.29	0.99	41.40	57.90 ± 7.81								
11salf13-14P2	1.731	89	20	450	7	0.90	0.81	38.30	0.99	35.30	58.48 ± 5.58								
11salf13-14P3	4.795	223	20	450	7	0.46	0.74	17.98	0.99	35.60	61.21 ± 5.71								
11SALF14																			
11salf14-1P1B	2.044	98	20	500	9	0.94	0.86	125.9	1.00	30.40	65.98 ± 2.95								
11salf14-1P2	2.028	104	100	500	8	0.94	0.85	139.7	1.00	30.60	68.15 ± 2.35								
11salf14-2P1	1.932	82	100	500	8	0.93	0.85	63.28	1.00	33.80	66.17 ± 4.97								
11salf14-2P2	1.349	52	100	500	8	0.94	0.84	50.33	0.99	36.20	66.54 ± 6.29								
11salf14-3P1A	2.429	95	100	500	8	0.93	0.83	31.40	0.99	36.20	66.10 ± 9.69	64.5	64.6	68.4	-3.3	56.5	61.9	11.5	10.8
11salf14-3P1B	2.311	94	100	500	8	0.93	0.83	31.43	0.99	37.90	66.81 ± 9.87	±		±	±	±			
11salf14-4P1	2.934	82	20	500	9	0.94	0.84	47.66	0.99	4.56	70.42 ± 8.21	1.6		1.6	3.8	2.1			
11salf14-4P3	4.702	67	20	500	9	0.95	0.84	37.31	0.99	9.58	67.78 ± 10.23								
11salf14-9P1B	1.286	67	20	500	9	0.93	0.82	66.78	1.00	34.50	59.39 ± 3.95								
11salf14-9P2	1.160	57	20	500	9	0.90	0.81	51.00	0.99	33.10	62.22 ± 6.21								
11salf14-17P1C	1.785	82	20	500	9	0.96	0.86	50.60	0.99	36.10	65.92 ± 7.53								
11salf14-17P2	1.802	72	20	500	8	0.95	0.81	57.88	0.99	38.20	64.02 ± 5.11								

échantillon	ARN	$\chi$ 10 <sup>5</sup> SI	Tmin °C	Tmax °C	n	f	g	q	ccl	QL	Fe $\pm$ $\sigma$ F $\mu$ T	Rn $\pm$ k95 $\mu$ T	Fpo $\mu$ T	FPa $\pm$ k95 $\mu$ T	Dms °	Ims °	IPa °	VDM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>	VADM 10 <sup>22</sup> Am <sup>2</sup>
11SALF15																			
11salf15-1P	6.747	974	100	410	6	0.64	0.77	36.38	1.00	10.60	65.43 $\pm$ 3.53								
11salf15-3P	2.085	555	100	410	7	0.76	0.78	55.15	1.00	4.98	70.46 $\pm$ 3.02								
11salf15-4P	1.757	371	100	360	5	0.66	0.78	17.43	1.00	7.90	63.42 $\pm$ 5.59								
11salf15-6P	1.708	558	100	410	6	0.85	0.78	104.0	1.00	4.86	64.89 $\pm$ 1.66								
11salf15-10P	3.862	426	100	500	7	0.85	0.80	40.74	1.00	13.40	65.46 $\pm$ 5.44								
11salf15-11P	2.448	396	100	410	7	0.65	0.80	89.12	1.00	8.79	67.35 $\pm$ 1.58	63.0	63.7	67.6	-5.6	55.9	61.4	11.5	10.6
11salf15-12P	2.701	136	100	500	7	0.77	0.69	223.7	1.00	31.30	63.60 $\pm$ 0.76	$\pm$		$\pm$	$\pm$	$\pm$			
11salf15-15P	2.701	142	100	500	7	0.68	0.63	16.77	1.00	34.80	58.21 $\pm$ 7.39	2.4		2.4	3.0	1.7			
11salf15-17P	2.191	280	100	410	6	0.84	0.81	36.01	1.00	17.2	54.99 $\pm$ 4.15								
11salf15-18P	3.846	400	100	500	7	0.88	0.78	62.77	1.00	16.90	60.47 $\pm$ 3.30								
11salf15-19P	2.578	147	100	500	7	0.92	0.59	79.29	1.00	30.00	60.54 $\pm$ 2.07								
11salf15-20P	3.924	640	100	500	7	0.86	0.80	44.73	1.00	10.30	61.80 $\pm$ 4.76								

tableau IV-10 : résumé des résultats de paléointensité, échantillon, numéro d'échantillon, \*, nl, désaimantation non linéaire, ARN, aimantation rémanente naturelle,  $\chi$ , susceptibilité en champ faible et à température ambiante, Tmin, température minimale et Tmax, température maximale utilisées, n, nombre d'étapes utilisées, f, fraction d'ARN utilisée, g, facteur de distance, q, facteur de qualité, ccl coefficient de corrélation linéaire, QL, rapport de Koenigsberger au laboratoire, Fe  $\pm$   $\sigma$ F estimation de la paleointensité et son erreur standard, Fm, intensité moyenne du lot et son intervalle de confiance à 95%, Fpo, intensité moyenne pondérée, F Pa, moyenne pondérée après correction de latitude à Paris, Dms, déclinaison moyenne du lot au site, Ims, inclinaison moyenne du lot au site, IPa, inclinaison moyenne à la latitude de Paris, VDM, moment dipolaire virtuel, VADM, moment dipolaire axial virtuel.

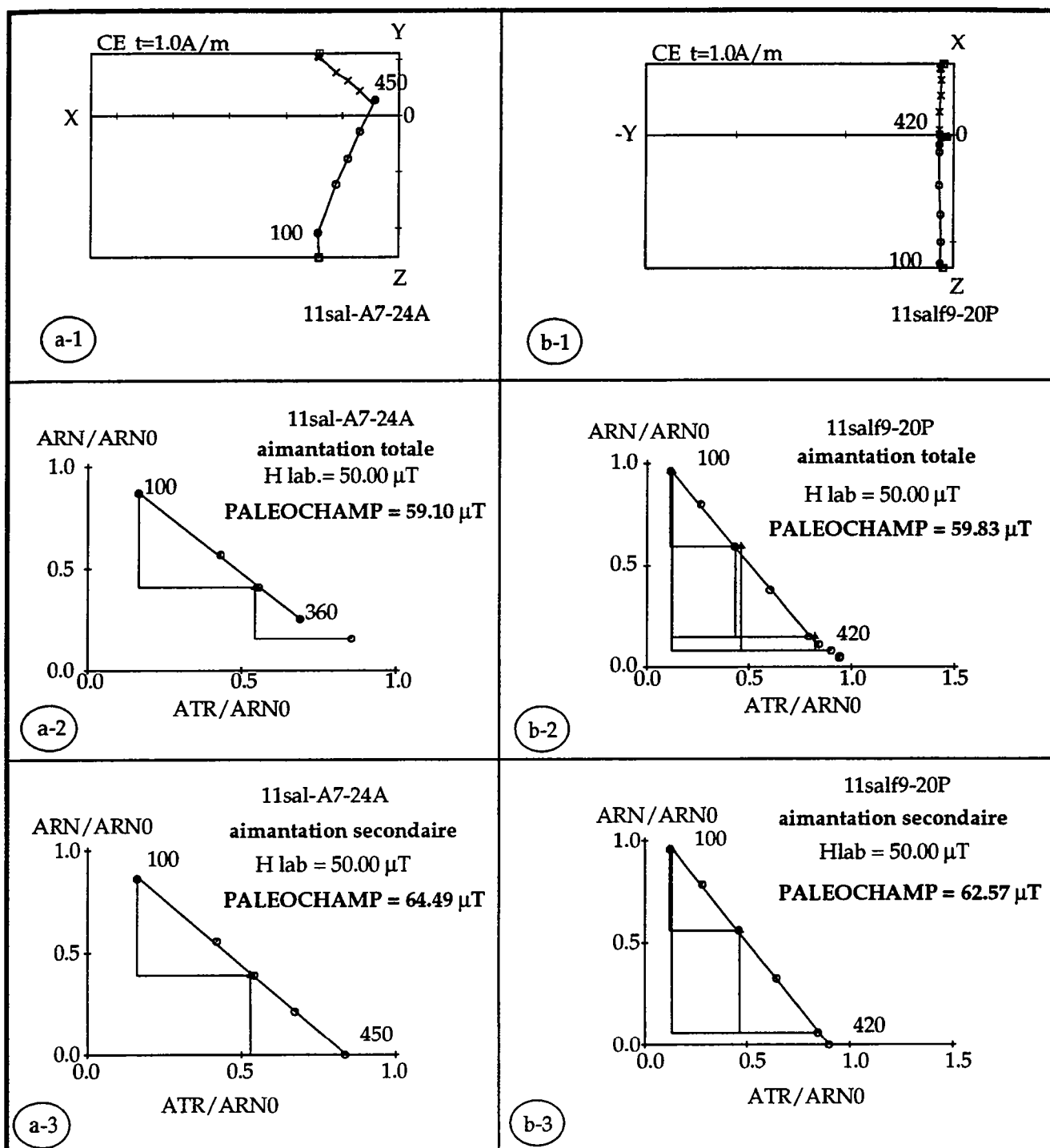


fig. IV-11 : effet de la correction des aimantations pour des désaimantations non linéaires, (a-1), zijderveld de l'échantillon 11salA7-24A entre 20 et 450°C, (b-1), zijderveld de l'échantillon 11salf9-20P entre 20 et 570°C, (a-2), diagramme d'Arai de l'échantillon 11salA7-24A avant correction, (b-2), diagramme d'Arai de l'échantillon 11salf9-20P avant correction, (a-3), diagramme d'Arai de l'échantillon 11salA7-24A après correction (l'aimantation restante après la chauffe à 450°C est enlevée), (b-3), diagramme d'Arai de l'échantillon 11salf9-20P après correction.

En guise de test, après avoir réaimanté neuf échantillons, représentatifs des valeurs extrêmes et intermédiaires d'archéointensités estimées pour 11salf7 (11salf7-1P0, 69.2  $\mu$ T, 11salf7-1P1, 76.2 $\mu$ T, 11salf7-2P0, 85.5  $\mu$ T, 11salf7-2P1, 69.3  $\mu$ T, 11salf7-6P4, 55.2  $\mu$ T, 11salf7-9P0, 62.5  $\mu$ T, 11salf7-12P0, 66.1  $\mu$ T, 11salf7-14P1, 51.3  $\mu$ T, 11salf7-15P0, 74.6  $\mu$ T), dans un champ de laboratoire de 50 $\mu$ T, nous avons refait une détermination de paléointensité.

Tous les échantillons ont permis de retrouver la valeur du champ de laboratoire (à 4% près) et aucune variation du spectre des températures de blocage n'est à noter.

Ces échantillons sont donc appropriés à la détermination de l'archéointensité, et nous ne comprenons pas l'origine de l'hétérogénéité des résultats.

### **Remarques à propos de la désaimantation non linéaire**

Bien que nous rejetons les échantillons dont l'aimantation est multicomposée, nous avons parfois calculé la paléointensité à partir de l'aimantation secondaire (fig. IV-11), lorsque cette dernière se révélait plus importante (11salA7-24A, 11salA7-25A, 11salA7-26A, 11salf3-3P, 11salf7-9P1, 11salf8-1P2, 11salf8-1P3, 11salf8-2P2, 11salf9-20P).

Les carottes sont extraites légèrement en retrait (5-10 cm peut-être, car les pièces prélevées ne sont pas plus longues) de la zone en contact direct avec les flammes et flux de chaleur. L'absorption calorique en fonction de l'épaisseur est probablement élevée, créant un fort gradient de température, et la température atteinte à l'emplacement de l'échantillon serait insuffisante pour effacer totalement l'aimantation primaire.

L'aimantation secondaire correspondrait alors bien avec la dernière chauffe du four (la température maximale atteinte lors de cette chauffe est tout de même élevée et varie entre 410 et 500°C, d'après nos échantillons).

Il est à noter que le carottage des échantillons pour les mesures des directions archéomagnétiques a été réalisé au plus près de la face exposée directement aux flammes et gaz issus du foyer. Aucun problème d'aimantation secondaire n'a été rencontré (Laubenheimer & Lanos, 1994).

L'explication pour les amphores serait légèrement différente, et nous supposons que l'origine d'aimantations de directions multiples est tout simplement à relier à un mouvement de celles-ci lors du refroidissement (effondrement de la charge ?).

La procédure d'estimation de l'intensité à partir de l'aimantation secondaire est simple. Elle consiste juste à extraire du vecteur total ARN le vecteur de l'aimantation primaire. On recalcule pour cela les mesures, effectuées aux différentes étapes, en enlevant selon les composantes x, y, z la valeur correspondant au vecteur de l'aimantation primaire (fig. IV-11) Seules sont conservées les valeurs correspondant à l'aimantation secondaire.

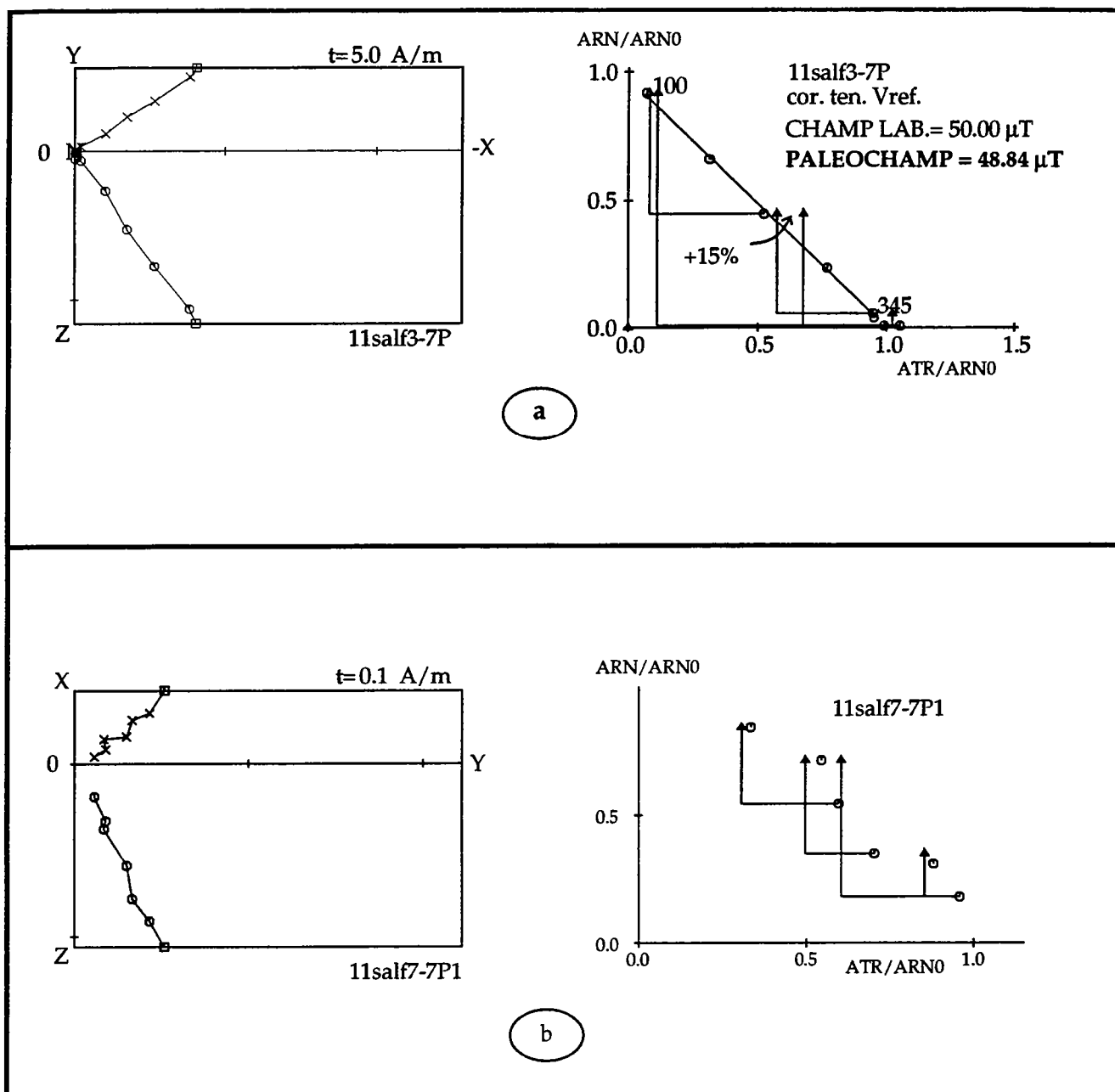


fig. IV-12 : exemples d'échantillons rejetés.

- a, zijderveld de l'échantillon 11salf3-7P ainsi que son diagramme d'Arai mettant en évidence une évolution de 15% de l'ATR à 260°C,
- b, zijderveld et diagramme d'Arai de l'échantillon 11salf7-7P1, totalement inutilisable.

Bien que donnant souvent de bons résultats (les moyennes, calculées avec ou sans ces intensités sont proches, voir tableau IV-10), cette correction souffre d'un défaut dans notre contexte de travail : les échantillons ont été carottés dans des repères indépendants les uns des autres, et rien ne permet d'affirmer que l'aimantation secondaire mesurée est bien synchrone de celles mesurées pour les autres échantillons (il est impossible de comparer les directions d'inclinaison et déclinaison).

Pour plus de fiabilité, les estimations moyennes par lot des archéointensités, sont calculées sans prendre en compte les intensités obtenues à partir d'aimantations secondaires.

## Echantillons rejetés

Nous présentons quelques exemples sur la figure IV-12. Des évolutions minéralogiques sont nettement observées sur ces échantillons lors des tests de contrôle.

## Calcul des intensités moyennes

Chaque intensité estimée par échantillon est pondérée à l'aide du facteur de pondération (Prévot & al., 1985). L'intensité du lot est obtenue par le calcul de la moyenne pondérée. Nous noterons ici que la différence entre moyenne simple et moyenne pondérée est très faible du fait de l'homogénéité des résultats.

L'erreur attribuée à la moyenne pondérée est celle obtenue avec le calcul de la moyenne arithmétique (Prévot & al., 1985).

lot	$F_p \pm ic_{95}$	$D_m \pm \sigma D$	$I_m \pm \sigma I$	VDM	VADM	Lat. PGV	Long. PGV	Age proposé
	( $\mu T$ )	( $^\circ$ )	( $^\circ$ )	$10^{22} Am^2$	$10^{22} Am^2$	( $^\circ$ )	( $^\circ$ )	ap. J.C.
11salf10	$60.7 \pm 1.8$	$0.2 \pm 3.9$	$62.5 \pm 1.8$	10.1	10.1	89.3	17.7	$0 \pm 30$
11salf12	$65.9 \pm 1.5$	$-1.6 \pm 2.2$	$57.8 \pm 1.2$	11.6	11.0	85.0	197.6	$70 \pm 20$
11salf13	$61.1 \pm 2.9$	$-5.1 \pm 1.8$	$56.7 \pm 1.0$	10.9	10.2	82.9	218.6	$130 \pm 30$
11salf15	$63.7 \pm 2.4$	$-5.6 \pm 3.0$	$55.9 \pm 1.7$	11.5	10.6	82.0	217.5	$150 \pm 30$
11salf3	$63.6 \pm 2.3$	$0.2 \pm 3.0$	$56.1 \pm 1.7$	11.4	10.6	83.5	181.3	$210 \pm 20$
11salf9	$65.2 \pm 2.9$	$0.3 \pm 3.6$	$56.9 \pm 2.0$	11.6	10.9	84.3	180.6	$215 \pm 20$
11sal-a7	$60.7 \pm 1.7$							$250 \pm 50$
11salf7	$58.7 \pm 5.0$	$1.2 \pm 4.3$	$58.5 \pm 2.3$	10.2	9.8	85.9	169.4	$265 \pm 30$
11salf8	$64.6 \pm 2.5$	$-2.8 \pm 5.1$	$56.5 \pm 2.8$	11.6	10.8	83.5	203.3	$310 \pm 30$
11salf14	$64.6 \pm 1.6$	$-3.3 \pm 3.8$	$56.5 \pm 2.1$	11.6	10.8	83.4	206.3	$310 \pm 30$

tableau IV-11: estimations des caractéristiques d'intensité et de directions magnétiques,  $F_p \pm ic_{95}$  estimation de l'intensité du champ ancien au site (moyenne pondérée) et son intervalle de confiance à 95% (calculé à partir de la moyenne non pondérée),  $D_m \pm \sigma D$ , déclinaison moyenne du lot,  $I_m \pm \sigma I$ , inclinaison moyenne au site, VDM, moment du dipolaire virtuel, VADM, moment dipolaire axial virtuel, Lat. PGV, latitude et, Long. PGV, longitude PGV.

Les estimations sont regroupées dans le tableau IV-11. Nous constatons que l'écart entre les valeurs d'intensité est très faible. Celles-ci varient de 58.7 à 65.9  $\mu$ T. L'erreur associée varie selon les lots entre 2.5 % et 8.5% de l'intensité estimée.

#### **IV-6 Interprétation des caractéristiques magnétiques enregistrées par les fours de Sallèles**

Quelles conclusions pouvons nous tirer de ces résultats ? Ceux-ci confirment-ils les propositions de datation ou bien de nouvelles interprétations apparaissent-elles ?

Si nous prenons en compte l'intervalle de confiance des valeurs, l'intensité n'est pas un facteur discriminant des solutions archéomagnétiques, à la différence des PGV pour lesquels nous pouvions nettement voir des incompatibilités de directions.

Nous notons toutefois que les résultats de 11salf8 et 11salf14 sont très proches par leurs valeurs d'intensité, déclinaison, inclinaison et VDM. Nous pouvons aussi remarquer que le lot d'amphores, daté au mieux du troisième siècle a une intensité très proche de la valeur estimée pour le four 11salf7.

Les légères différences d'intensité observées pour les autres lots sont-elles significatives ?

Nous avons essayé d'utiliser une analyse multivariée, où sont introduites les valeurs d'intensité et de directions archéomagnétiques, pour différencier les lots étudiés.

L'analyse factorielle nous a semblé être la méthode adéquate pour répondre à cette question.

#### **Analyse factorielle des trois caractéristiques inclinaison, déclinaison et intensité**

Comme nos données sont hétérogènes (intensités magnétiques et des mesures d'angles), nous avons utilisé la méthode d'analyse des composantes principales. Afin d'augmenter l'homogénéité des grandeurs utilisées, les données ont été centrées et réduites.

L'algorithme de calcul est celui présenté par P. Cibois (1987), que nous avons informatisé.

Plusieurs simulations ont été réalisées. En effet, afin de prendre en compte l'incertitude associée aux valeurs moyennes des caractéristiques magnétiques, nous avons rajouté un "bruit" de type gaussien aux données destinées à l'analyse :

- $\sigma I$  et  $\sigma D$  ont été recalculées pour une loi de distribution normale, à partir des valeurs  $\alpha_{95}$  calculées pour la statistique de Fisher (1983),
- le bruit,  $V_i$ , attribué à chaque valeur  $X_i$  (variable I, D ou F), est calculé d'après la formule suivante :

$$V_i = \sqrt{-2 \ln(U1) \cdot \sin(2\pi \cdot U2)} \quad f_{IV-1}$$



où  $U1$  et  $U2$  sont deux variables aléatoires réelles (VAR) uniformes sur  $[0,1]$  et  $V_i$  une V.A.R. gaussienne centrée sur 0 et d'écart type 1,

- calculée pour chacune des trois composantes magnétiques, la donnée bruitée,  $B_i$ , est alors :

$$B_i = X_i + V_i \cdot \sigma X_i$$

*f IV-2*

Une centaine de simulations ont été réalisées pour chaque contexte étudié, permettant de calculer la médiane, la moyenne et l'écart-type des coordonnées de chaque lot présents (un contexte correspondant à un ensemble défini de lots réunis pour l'analyse). A chaque simulation les bruits rajoutés aux valeurs moyennes sont différents. L'utilisation du mode, pour caractériser la disposition d'un lot, aurait du être le plus intéressant, mais la distribution est parfois bimodale, ce qui ne nous permet pas de distinguer la tendance de répartition. Nous avons donc utilisé la médiane et la moyenne à cette fin, bien qu'elles soient décalées les unes des autres, et du mode. L'usage de la moyenne offre l'avantage de pouvoir visualiser la répartition des points à un ou plusieurs écarts-types, et permet ainsi de se faire une idée de la dispersion.

Nous avons réalisé un premier essai, tous les fours étant présents dans l'analyse.

La première impression est celle d'un éparpillement sur toute la surface (délimitée par le calcul) des points de tous les lots. Nous pensons que la forte dispersion observée provient de la faiblesse des écarts entre les valeurs de chaque lot, que ce soit en inclinaison, déclinaison ou intensité. Ceci a pour conséquence de rendre chaque étape de simulation très sensible au bruitage aléatoire, lequel est d'ailleurs particulièrement influent sur les valeurs de déclinaison.

Mais en y regardant de plus près, et aidé par la représentation de la médiane ou de la moyenne, une certaine organisation apparaît. Des pôles peuvent être dégagés en fonction des différentes attractions (voir fig. IV-13, où nous avons figuré l'analyse réalisée à partir des caractéristiques des fours de Sallèles-d'Aude, et celles du four de Luxeuil Les Bains, lot 70LUX-F du chapitre III).

On y retrouve le couple formé par les lots 11salf13 et 11salf15, à l'opposé de 70LUX-F. Les lots 11salf8 et 11salf14 sont très proches de l'origine et l'un de l'autre. La médiane du four 12 chevauche celle du four 10. Les pôles des fours 7, 3 et 9 sont disposés dans le même quart, le four 3 à équidistance du 7 et du 9. On notera la position extrême du four 70LUX-F.

Afin de vérifier ces résultats nous avons décidé de recommencer ces simulations, uniquement avec Sallèles-d'Aude, en enlevant un lot différent à chaque essai, chaque nouveau contexte correspondant à un ensemble de huit fours au lieu de neuf.

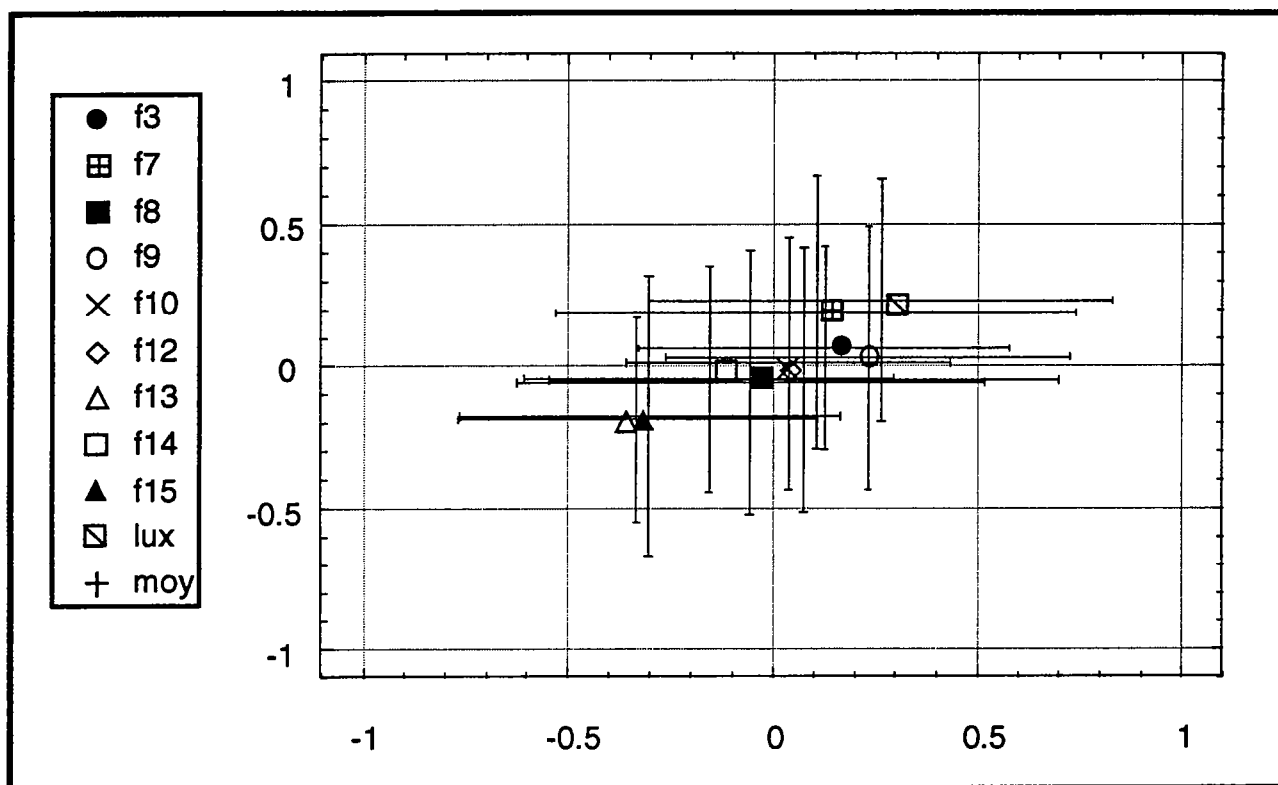


fig. IV-13 : Essai d'analyse factorielle sur les caractéristiques magnétiques, inclinaison, déclinaison et intensité, enregistrées par les fours de Sallèles d'Aude et le four de Luxeuil les Bains (référéncé "lux") lors de leur dernier fonctionnement. Ces analyses tiennent compte de l'incertitude attachée à chaque estimation de valeur moyenne : ainsi à chaque simulation correspond une distribution de valeurs différemment bruitées (voir texte).

- médianes (symboles différents) et moyennes (croix avec la représentation de la valeur d'un écart type) calculées pour chaque four à partir de la totalité des simulations. La médiane du four 12, f12, est superposée à celle du four 10, f10.

Les nouveaux résultats permettent de confirmer ou de préciser les observations précédentes :

- regroupement par deux des lots 11salf13 et 11salf15, 11salf8 et 11salf14, ainsi que 11salf3 et 11salf9,
- indépendance des lots 11salf10, 11salf12, et 11salf7.

En conclusion nous en tirons les relations suivantes :

- les fours 3 et 9 présentent les mêmes caractéristiques, et il en est de même pour les fours 13 et 15. Il en est probablement ainsi pour les fours 8 et 14. Ces trois couples apparaissent séparés, sans liens entre paires,

- le four 7 ne semble ni à relier au fours 9 et 3, ni aux fours 8 et 14.

Nous retrouvons donc les entités suivantes :

- four 10,
- four 7,
- four 12,
- fours 3 et 9,
- fours 8 et 14,
- et fours 13 et 15.

Les remarques effectuées suite à cette analyse n'ont pas la fiabilité des directions de PGV, mais ces résultats sont intéressants dans la mesure où malgré leur "fragilité", nous ne raisonnons ici que par rapport aux médianes ou aux moyennes (sans tenir compte de l'incertitude associée à ces valeurs), ils tendent à confirmer nos déductions, lesquelles, il est vrai, sont elles aussi issues de l'observation des différentes valeurs d'inclinaison et de déclinaison.

## Chronologie d'arrêt de fonctionnement des fours

Les résultats d'estimation de l'intensité, ainsi que, dans un degré d'importance moindre, les analyses factorielles, ne remettent pas en question la chronologie d'arrêts de fonctionnement des fours, proposée au début de ce chapitre. En conséquence celle-ci est conservée (tableau IV-11)

Nous remarquerons que la succession proposée se traduit architecturalement par une évolution des modèles de fours construits, avec des formes anciennes circulaires, relayées à partir de la première moitié du second siècle par des fours de forme rectangulaire. Le four 3 semble avoir été la plus longue survivance de four circulaire sur le site.

## IV-7 Conclusion

L'étude des lots du site de Sallèles-d'Aude, nous permet d'obtenir des valeurs d'intensité relativement homogènes, variant peu, entre  $58,7 \pm 5,0$  et  $65,9 \pm 1,5 \mu\text{T}$  au site, soit  $62,2$  et  $69,8 \mu\text{T}$  à la

latitude de Paris. Celles-ci sont compatibles, durant la période gallo-romaine, avec celles présentées au chapitre III.

L'incertitude associée à ces valeurs est faible et varie de 2,5 à 8,5% de l'intensité estimée. La dispersion la plus élevée est observée sur un lot, 11salf7, et nous n'en comprenons pas la raison, la détermination des directions archéomagnétiques n'ayant pas posé de problème particulier, et la vérification des paléointensités acquises au laboratoire ayant été effectuée avec succès.

Un des principaux problèmes de ce site est la rareté de renseignements archéologiques permettant de cerner les durées d'activités des fours et leurs âges. Outre la détermination de l'intensité notre propos était aussi d'essayer d'établir une chronologie des arrêts de fonctionnement.

Par confrontation des quelques contraintes archéologiques et des directions archéomagnétiques, avec l'emploi des PGV de ces directions, nous avons pu proposer une succession des dates de cessation d'activité. Cette chronologie n'a pas été remise en question par les nouveaux résultats apportés par l'étude d'archéointensité. Si ces derniers n'apparaissent pas comme discriminants pour contraindre des modèles de chronologie, dans le cadre bien défini de Sallèles, ils n'en sont pas moins importants dans la mesure où ils ne contredisent pas celle qui est déjà proposée.

L'utilisation des analyses factorielles est nouvelle ici. C'est un mode d'analyse qui permet l'utilisation simultanée des trois points de comparaison que sont les variables inclinaison, déclinaison et intensité, obtenues par prélèvements et mesures archéomagnétiques d'un matériel orienté in-situ. La faille de notre raisonnement est qu'il repose uniquement sur la disposition moyenne des points (moyenne ou médiane). Or, vu la dispersion de ceux-ci, nous ne pouvons que parler de "tendances" de regroupement de pôles, plutôt que de certitudes. Quoiqu'il en soit, en prenant nos précautions quant aux interprétations, les résultats obtenus pour les lots de Sallèles renforcent les impressions de groupements des directions archéomagnétiques de certains fours, groupes qui apparaissaient déjà dans la projection des PGV.

Nous avons interprété l'égalité des valeurs archéomagnétiques comme le signe d'un arrêt simultané des fours. En l'absence de plus de renseignements nous avons peut-être fait une erreur.

Seule une étude de datation par une technique différente de l'archéomagnétisme permettrait de nous renseigner. Une datation de type  $^{14}\text{C}$  par exemple serait la bienvenue, en permettant de "caler" une fois pour toutes certains fours. Les fours 8 et 14 par exemple, ont été resitués dans un contexte de début quatrième siècle. Mais nous pouvons remarquer que les valeurs d'intensité, et d'inclinaisons sont similaires à celles des fours 9 et 13. Les valeurs de déclinaisons sont légèrement différentes mais ne sont pas incompatibles. Dans le chapitre III le four 35127A, censé être contemporain ( $330 \pm 30$  pour  $310 \pm 30$ ), présente une intensité moyenne plus proche des valeurs observées pour 11salf7 ou 11sal-A7 (voir tableau III-10) que de celles mesurées pour 11salf14 et 11salf12. Bien que toutes ces valeurs d'intensités restent compatibles aux barres d'erreur près, nous serions curieux de connaître les résultats d'une autre étude de datation des fours 8, 9, 12 et 14.

## **Chapitre V**

### **Variation séculaire de l'intensité en Europe de l'Ouest durant les deux derniers millénaires**

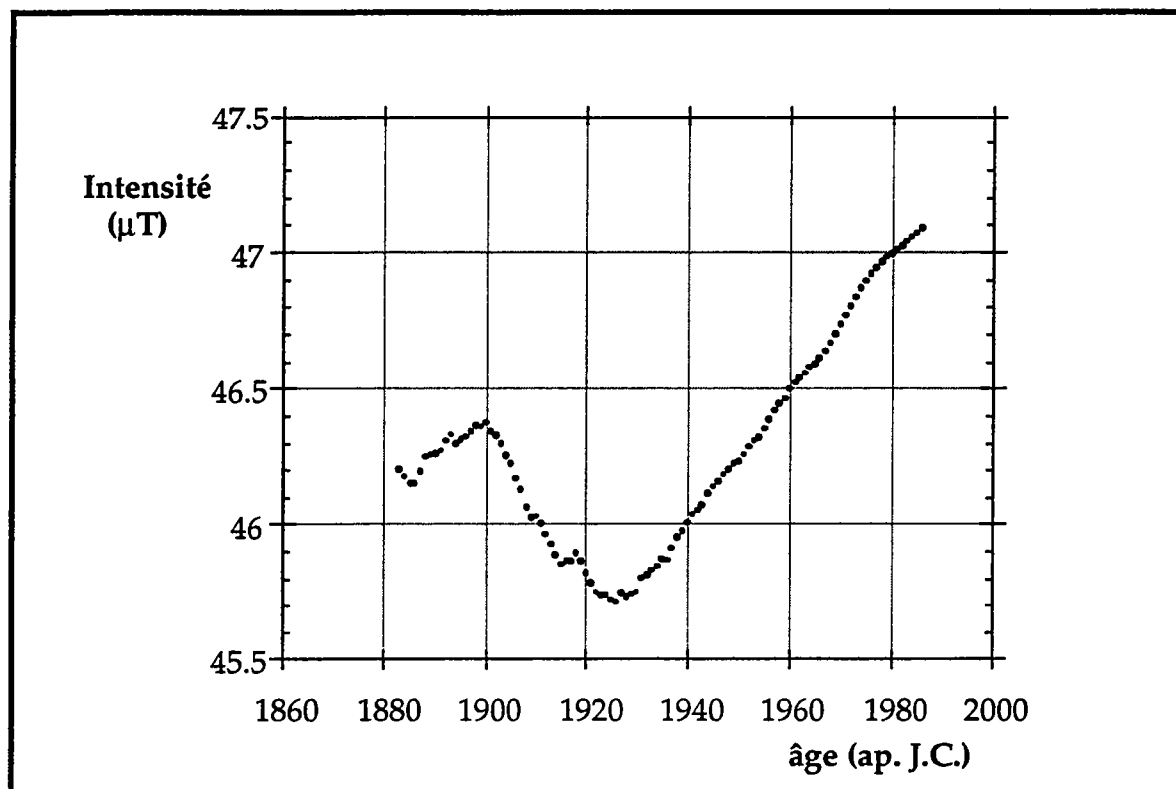


fig. V-1 : variation de l'intensité, mesures directes d'observatoires en région parisienne (Menvielle & al., 1983)

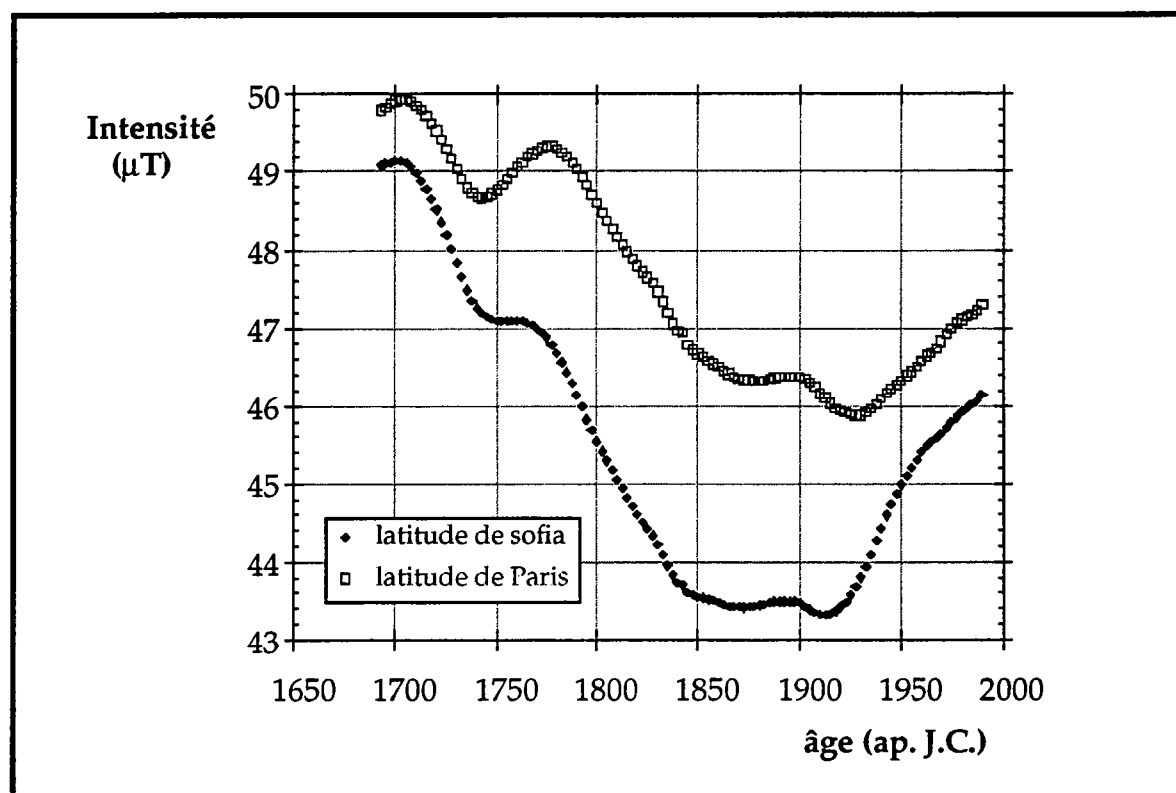


fig. V-2 : reconstitution de la variation séculaire de l'intensité dans le passé proche, d'après le modèle Bloxham & Jackson 1992. Calculs réalisés pour la latitude de Paris et de Sofia.

## **V - Variation séculaire de l'intensité en Europe de l'Ouest durant les deux derniers millénaires**

### **V-I Etat des connaissances de la variation de l'intensité**

#### **V-I-1 Observations directes**

Il semble que la première mesure directe de l'intensité ait été effectuée en France en 1848. Cette mesure référencée par Thellier & Thellier (1959) reste toutefois qualifiée de sommaire par ces derniers.

Les premières mesures directes fiables de l'intensité ont débuté à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (1883) à l'Observatoire du Parc St-Maur, près de Paris. L'Observatoire a été par la suite transféré à Val-joyeux en 1901, puis à Chambon-la-Forêt en 1936 (Menvielle et al., 1987).

La période couverte par les mesures est donc très courte, et s'étale sur un siècle environ.

La figure de cette variation (fig. V-1) se présente sous la forme d'un "V" ouvert, avec vers 1880 une valeur moyenne annuelle de 46.20  $\mu\text{T}$ , suivi d'un maximum à 46.37  $\mu\text{T}$  en 1900, un deuxième minimum de 45.71  $\mu\text{T}$  vers 1926, et depuis, une croissance relativement régulière pour atteindre  $\pm 47.09 \mu\text{T}$  en 1986.

#### **V-I-2 Reconstitution des courbes de variation : utilisation de modèles de champ**

C'est le résultat de modélisations effectuées à partir de mesures directes à travers le monde. Ainsi, pour les modèles les plus récents, Bloxham et Jackson présentent en 1992 le résultat de leur compilation de données. Celles-ci proviennent soit d'observations satellites, soit de mesures à partir d'observatoires terrestres, soit de relevés effectués à bord de bateaux.

L'ensemble de ces données a été utilisé pour calculer les coefficients du développement en harmoniques sphériques du potentiel magnétique jusqu'à l'ordre 10.

La précision variant avec le nombre et la qualité des données, l'estimation effectuée pour les périodes anciennes, celle qui nous intéresse le plus, est la moins sûre.

Deux modèles ont été élaborés, un pour 1690-1840, le second pour 1840-1990. Ce choix a été dicté par l'absence de mesures d'intensité antérieures à 1840. Pour cette période, les valeurs d'intensités ont été estimées à partir des autres mesures de direction (inclinaison et déclinaison), et en utilisant le modèle d'extrapolation à partir du dipôle, présenté par Barraclough en 1974.

Le modèle de Bloxham et Jackson (1992) présente pour nous moins d'intérêts entre 1840 et l'actuel, puisque nous possédons les mesures directes de Chambon-la-Forêt (fig. V-2). Nous pouvons toutefois vérifier sa bonne intégration aux valeurs d'Observatoire.

Entre 1700 et 1840 ce modèle décrit, à Paris, un champ de valeur maximale 50  $\mu\text{T}$ , puis un minimum en 1740 (48.6 $\mu\text{T}$ ), un nouveau maximum vers 1775 (49.3 $\mu\text{T}$ ) puis une décroissance relativement régulière jusque vers 1875 (46.3 $\mu\text{T}$ ). Entre 1775 et 1875, de même que depuis 1930, le taux de variation serait donc un taux de -3  $\mu\text{T}$  par siècle, valeur égale en valeur absolue au taux trouvé depuis 1930.

On remarquera que le taux calculé est loin d'être négligeable car 3  $\mu\text{T}$  de variation représente quand même 16% de la valeur du champ actuellement mesuré.

### **V-I-3 Mesures d'archéointensité.**

Comme nous l'avons déjà dit dans le chapitre I, très peu de données d'archéointensité sont disponibles pour la France (fig. I-33). Ces données sont au nombre d'une quarantaine, dont la majorité obtenues durant la période gallo-romaine, mais elles ne permettent pas d'avoir une vision précise de la variation séculaire, ne serait-ce que sur cette petite période de temps.

Nous allons essayer de la compléter en utilisant nos propres résultats ainsi que ceux obtenus pour des pays limitrophes. Mais avant de réunir ces données, nous allons examiner quelles sont les possibilités de réduire toutes ces informations comme si elles avaient été calculées pour un point unique de référence.

### **V-2 Variation de l'intensité en fonction de la latitude**

Après avoir obtenu l'information désirée, l'intensité estimée au site dans la tranche d'âge allouée au matériel daté, celle-ci est peu utilisable car elle reste isolée. Elle n'a de rapport qu'avec le site et l'âge considéré.

Si l'archéomagnéticien avait la possibilité d'établir, pour une aire et un âge choisis (par exemple le territoire de la France), une carte de répartition de l'intensité, alors l'information ponctuelle précédente pourrait prendre toute sa valeur. Il serait possible de la comparer avec les données de même nature l'environnant.

Or il n'en est rien. L'archéomagnéticien a déjà beaucoup de mal à rassembler du matériel pour établir une "tranche" temporelle, une suite chronologique (ceci est nettement visible dans la sélection des sites étudiés par tous les auteurs, lesquels ne représentent pas, loin de là, une continuité temporelle depuis l'Antiquité, cf. Daly et Le Goff, 1996).



L'établissement de cartes magnétiques pour le passé lointain, est donc encore un souhait ébauché, un projet à longue échéance (Thellier & Thellier tenaient les mêmes propos en 1959).

## V-2-1 Utilisation d'un site de référence

Afin d'utiliser les quelques données disponibles, nous sommes donc amenés à les réduire dans un contexte où il est possible de les comparer.

La finalité de ce travail étant d'obtenir une meilleure connaissance de la courbe de variation de l'intensité, nous avons choisi d'établir cette courbe de variation en un point de référence.

La ville de Paris a été choisie pour plusieurs raisons :

- primo, les premières mesures directes et continues d'intensité depuis un observatoire ont été effectuées à St Maur-des-Fossés (94) à 10 Km au sud-est de Paris.

- secundo, c'est aussi à St-Maur que Thellier a effectué ses travaux et c'est à ce point qu'il a ramené ses résultats d'estimations.

- tertio, suivant ces mêmes raisons les courbes de variation de l'inclinaison et déclinaison, pour la France, sont déjà établies pour cette latitude et cette longitude.

Il apparait donc logique d'établir une courbe de référence de variation d'archéointensité à cette latitude et longitude.

Recalculer l'intensité en un point référence à partir d'une valeur obtenue pour un site particulier ne se fait pas automatiquement. Ceci est lié à la nature composite du champ magnétique (champ dipolaire et non dipolaire, anomalies crustales).

Cette réduction introduit évidemment une certaine proportion d'erreur sur l'estimation de la valeur de l'intensité au point de référence. Cette erreur est impossible à chiffrer dans la mesure où justement on ignore qu'elles étaient les caractéristiques du champ dans le passé.

Si l'on admet que ces dernières étaient proches de celles d'aujourd'hui (la courbe de variation séculaire de déclinaison et inclinaison depuis les derniers deux mille ans ne comporte pas d'événements magnétiques particuliers, comme une inversion par exemple, pouvant infirmer cette hypothèse, et les reconstitutions d'évolution de PGM selon Merrill & Mc Elhinny 1983, ou Daly & Le Goff 1996, fig. I-13, nous montrent des PGM qui restent proches du PNG), nous pouvons calculer qu'elle est la sur- ou sous-estimation de l'intensité lorsque le champ passé est assimilé au champ actuel.

## V-2-2 Modélisation et simplification des modèles de champ.

Nous l'avons vu précédemment (modèle Bloxham et Jackson), dans certaines conditions le champ total à la surface de la terre peut être modélisé à partir d'une analyse en harmonique sphérique (cf. Chapitre I). Mais cette analyse, pour être achevée, nécessite la connaissance des valeurs de déclinaison, inclinaison, et intensité, sur la surface du globe, à un instant donné. Bien que des groupes comme le GDR de Magnétisme des Roches (GDR 1083) se penche actuellement sur ce problème, la connaissance de ces informations est encore partielle (surtout en ce qui concerne l'intensité, cf. Daly & Le Goff, 1996).

Trois outils ont été développés afin de permettre les comparaisons entre données d'intensité provenant de régions géographiques différentes :

- calcul du moment dipolaire virtuel (VDM),
- calcul du moment dipolaire réduit (RDM),
- et calcul du moment du dipôle virtuel axial (VADM)

### 1) VDM

Le premier modèle, le plus réaliste, est celui du dipôle centré (mais non axial). La relation entre l'intensité  $F$ , mesurée au site (en microTesla), l'inclinaison liée,  $I$ , et le moment dipolaire (en  $\text{Am}^2$ ),  $M$ , est la suivante :

$$F = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2 I}} \quad f \text{ V-1}$$

où  $\mu_0$  est la perméabilité du vide ( $4 \pi 10^{-7}$  henries/m), et  $R$  le rayon terrestre (6371 km environ).

Le moment dipolaire  $M$  est considéré comme moment dipolaire virtuel (ou VDM, Virtual Dipole Moment, Smith, 1967).

La qualité de ce modèle est que l'oscillation dans le temps du dipôle, autour de l'axe de rotation, n'introduit pas de dispersion dans le VDM. Par contre, l'incertitude liée aux estimations d'inclinaison peut apporter une part supplémentaire d'erreur en plus de celles liées à l'intensité (Barton & al., 1979).

## 2) modèle du RDM

Smith (1967) a aussi introduit un deuxième modèle (dérivé du premier). Celui-ci est utilisable lorsque les données d'inclinaison au site sont inconnues. Partant du principe que l'inclinaison de l'axe du dipôle par rapport à l'axe de rotation a probablement peu bougé durant la période historique, ce que semble confirmer les travaux comme ceux de Daly & Le Goff, (1996), Smith propose d'utiliser les caractéristiques du dipôle actuel (écart angulaire entre PNG et PNM de 11.5°) comme étant celles des derniers millénaires. Il est ainsi possible de calculer un pseudo-VDM, appelé moment dipolaire réduit (Reduced Dipole Moment, RDM) en utilisant la latitude magnétique actuelle au site ( $\lambda_p$ ).

$$F = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2(\lambda_p)}}{4 \cdot \pi \cdot R^3} \quad fV-2$$

L'avantage de ce modèle est évidemment que la valeur de l'inclinaison ancienne au site n'a plus besoin d'être connue. Plus la période étudiée est proche de l'ère actuelle et plus le modèle est approprié.

Les inconvénients peuvent provenir du fait que l'axe du dipôle ancien ne coïncide pas obligatoirement avec l'axe actuel (Barton & al., 1979).

## 3) modèle du VADM

Le troisième modèle est le moins réaliste car l'axe du dipôle est confondu avec l'axe de rotation. C'est le dipôle axial centré. Le moment magnétique est alors relié à l'intensité ainsi qu'à la latitude  $\lambda$ , alors égale à la latitude magnétique, ou à la colatitude  $\theta$  du site. On parle alors de moment dipolaire axial virtuel (ou VADM, Virtual Axial Dipole Moment).

$$F = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2 \lambda}}{4 \cdot \pi \cdot R^3} \quad fV-3$$

(Les unités sont identiques aux précédentes)

Ce modèle est pratique à utiliser lorsque la valeur d'inclinaison au site est inconnue.

Nous allons voir par la suite que la majorité des données bibliographiques sont présentées sans information sur l'inclinaison. Cette lacune provient du fait que les études portent principalement sur du matériel déplacé, dont on ignore la position de cuisson qui aurait permis de calculer l'inclinaison au site.

Evidemment l'assimilation de l'axe du dipôle à l'axe de rotation terrestre est une source d'erreur supplémentaire sur l'estimation du moment magnétique.

### V-2-3 Formules de correction de latitude appliquées au calcul de l'intensité en un point de référence

A partir des relations précédentes il est possible de déduire deux formules de correction de latitude.

#### 1) Modèle du VDM

Dans le cas d'un modèle de champ dipolaire centré nous pouvons écrire :

$$F_s = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2(I_s)}} \quad fV-4$$

et de même

$$F_r = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2(I_r)}} \quad fV-5$$

$F_s$  et  $I_s$  étant l'intensité et l'inclinaison au site et  $F_r$  et  $I_r$  l'intensité et l'inclinaison au point de référence.

De ces deux formules ( $fV-4$  et  $fV-5$ ), il est aisé d'extraire l'expression du moment dipolaire  $M$  qui est censé être identique dans les deux cas.

On en déduit alors la formule suivante qui va nous servir à recalculer l'intensité au point de référence, connaissant l'intensité au site :

$$F_r = F_s \cdot \frac{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2(I_s)}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2(I_r)}} \quad fV-6$$

Cette formule n'est utilisable en archéomagnétisme que lorsque la valeur de l'inclinaison au point de référence est connue.

## 2) Modèle du VADM

Pour un modèle de champ magnétique centré axial nous déduisons de la même façon la formule suivante :

$$Fr = Fs \cdot \frac{\sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2(\lambda r)}}{\sqrt{1 + 3 \cdot \sin^2(\lambda s)}} \quad f V-7$$

$\lambda r$  et  $\lambda s$  étant les latitudes du point de référence et du site.

On remarquera que cette formule a été utilisée dès 1961 par Doell & al. (Merrill & Mc Elhinny, 1983) pour recalculer les données de Thellier & al. (1959) au point de référence 50°N, 5°E.

### V-2-4 Effets de la correction de latitude.

Nous savons déjà que l'assimilation du CMT à celui créé par un dipôle magnétique engendre une erreur du fait que l'on ne tient pas compte du comportement non dipolaire du champ. Cette cause d'erreur a déjà été décrite par Thellier & al. en 1959.

Nous pouvons tester l'ordre de grandeur de l'erreur que peut engendrer la formule (V- 7), déduite du modèle de champ dipolaire axial centré (VADM), dans le cadre bien défini des caractéristiques actuelles du champ.

Nous allons utiliser pour cela les relevés des stations d'observatoires français (Institut de Physique du Globe de Paris, réseau magnétique de répétition de la France, fascicule 54, 1987).

A partir d'observatoires situés à peu près sur la même longitude que Chambon-la-Forêt (lat. : 48.02°, long : 2.26° E), nous allons recalculer à deux âges différents (1967 et 1987.5) l'intensité estimée à cet observatoire (le plus proche de Paris). Ces données sont présentées dans le tableau V-2.

Bien que le rapport ( $\delta F / \delta \lambda$ ) évolue avec l'écart angulaire, on peut l'assimiler à un rapport constant de l'ordre de 0.15  $\mu T$  / par degré d'écart.

En utilisant ce rapport nous pouvons prédire, pour des données provenant de sites écartés de 15° en latitude de Paris, une sur ou sous-estimation de 2.3  $\mu T$  de l'intensité. Cette valeur nous apparaît comme une valeur limite qui permet de définir une aire de provenance des données, pour réajustement à Paris, située sur un carré centré sur Paris, d'arrête 30°. Tous les pays de l'Europe de l'Ouest y sont aisément englobés.

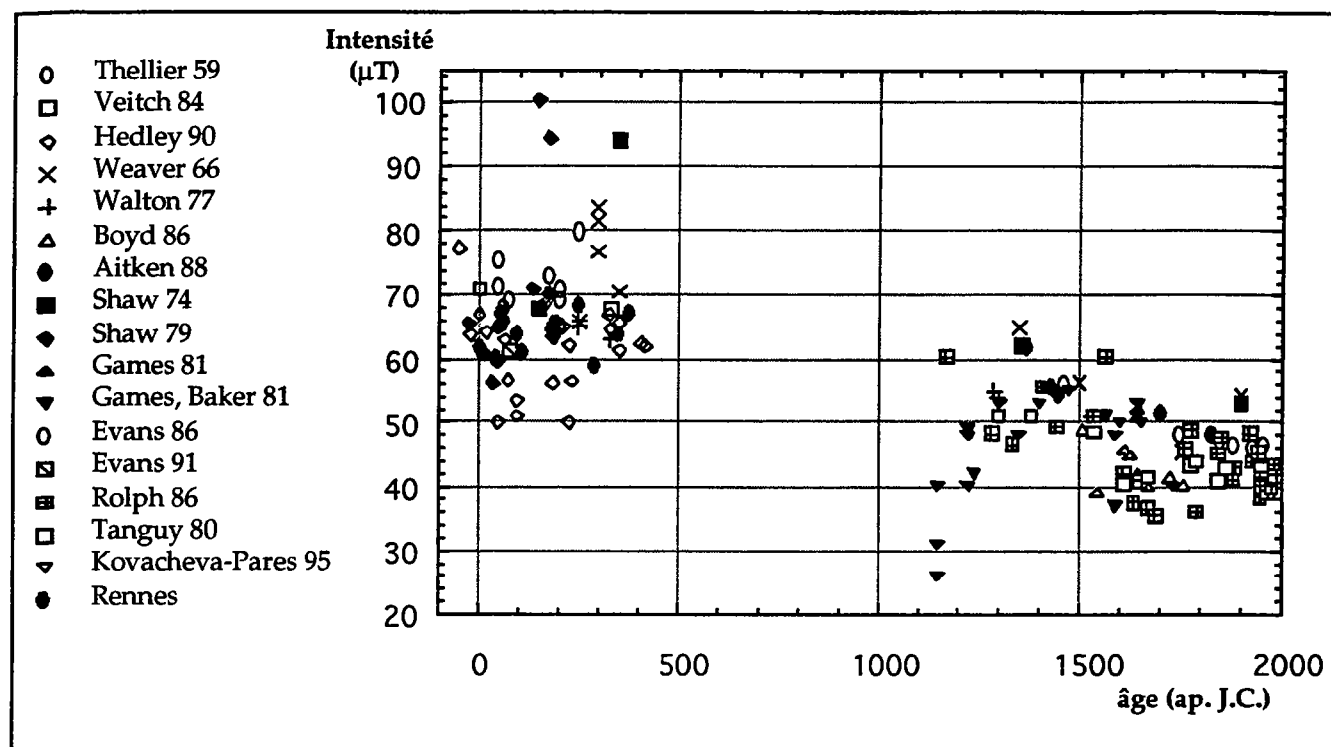


fig. V-3 : compilation des données d'étude de l'archéointensité en Europe de l'Ouest (Grande Bretagne, Pays-Bas, Allemagne, Belgique, Suisse, Italie, Pays ibériques et Nord du Maroc. Les valeurs sont présentées sans leurs barres d'erreur, en fonction de leurs références bibliographiques et sans application de la correction de latitude.

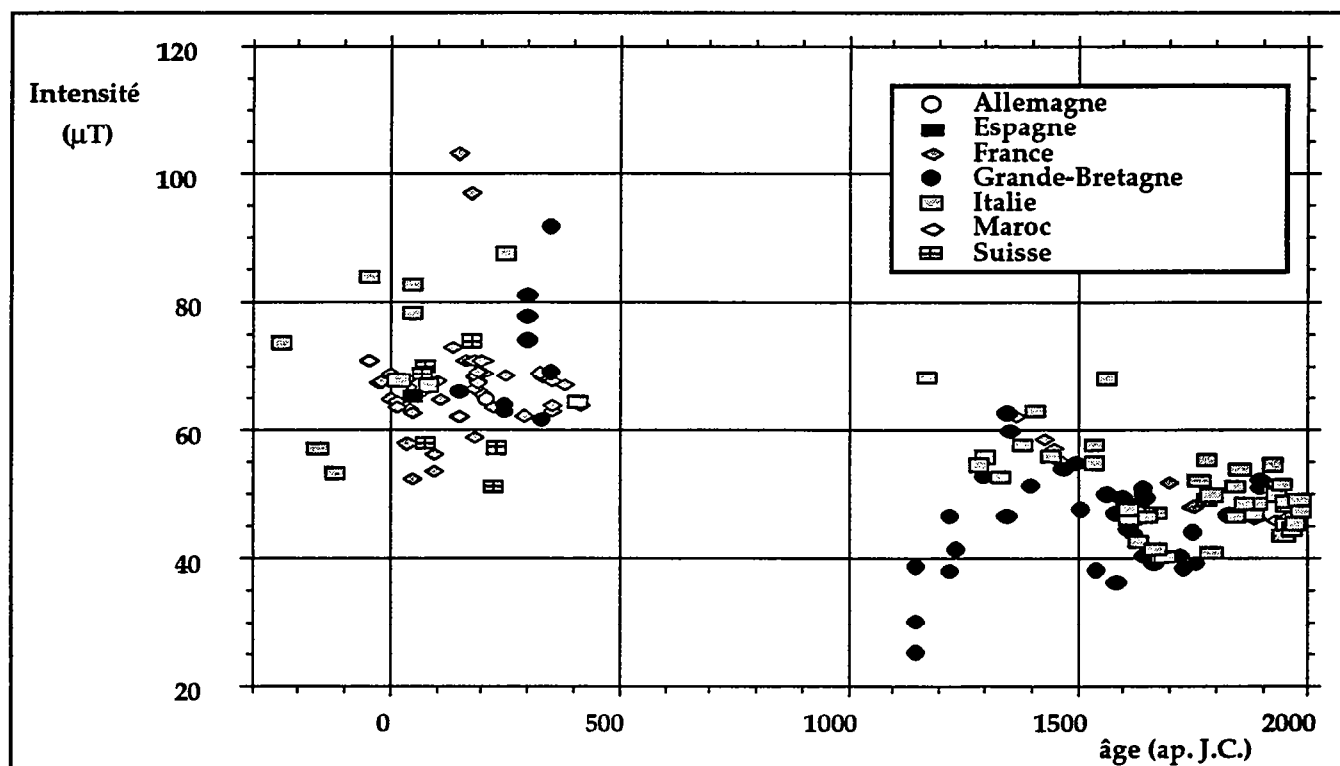


fig. V-4 : compilation des données d'étude de l'archéointensité en Europe de l'Ouest (Grande Bretagne, Pays-Bas, Allemagne, Belgique, Suisse, Italie, Pays ibériques et Nord du Maroc. Les valeurs sont présentées sans leurs barres d'erreur, en fonction de leurs provenances géographiques.

station	$\lambda$	F 1965	F est	F 1987.5	Fest.	$\delta\lambda$	$\delta F_{1965}$	$\delta F_{1987.5}$	$\delta F$ moy	$\delta F / \delta\lambda$
	°	$\mu T$	$\mu T$	$\mu T$	$\mu T$	°	$\mu T$	$\mu T$	$\mu T$	$\mu T / ^\circ$
Delettes	50.597	47.249	46.108	47.793	46.639	2.573	-0.477	-0.466	-0.471	-0.183
Neuchatel	49.797	46.991	46.199	47.521	46.720	1.773	-0.386	-0.385	-0.385	-0.217
CLF	48.024	46.585	47.105			0	0	0	0	
Nuret le F.	46.673	46.148	46.772	46.635	47.266	-1.351	0.187	0.121	0.154	-0.114
Salon la tour	45.460	45.722	46.919	46.197	47.707	-2.564	0.334	0.302	0.318	-0.124
Rieupeyroux	44.330	45.346	47.089	45.818	47.579	-3.694	0.504	0.474	0.489	-0.132
Tuchan	42.875	44.875	47.336	45.343	47.830	-5.149	0.751	0.725	0.738	-0.143

tableau V-2 : estimation de l'intensité au site de référence (Chambon-la-forêt, CLF) à partir de mesures effectuées à différentes stations et par l'utilisation de la formule de correction de la latitude (f V-7) station, station de mesure,  $\lambda$ , latitude de la station de mesure, F1965, intensité mesurée à la station en 1965, F est., intensité estimée à latitude de Chambon, à partir de l'intensité mesurée à la station, F1987.5, intensité mesurée à la station en 1987.5,  $\delta\lambda$ , différence de latitude entre la station et l'observatoire de Chambon,  $\delta F_{1965}$ , ( $\delta F_{1987.5}$ ), différence entre intensité estimée et intensité réelle, en 1965 1987.5),  $\delta F$  moy, moyenne des différences,  $\delta F / \delta\lambda$ , rapport entre différence d'intensité et différence de latitude à l'observatoire de Chambon.

Il est évident que les chiffres présentés ici ne sont valables que pour les données modernes. Il est possible que les caractéristiques du champ n'aient pas du tout présenté cette progression par rapport à la latitude de Paris dans les temps anciens. Nos chiffres ont toutefois l'avantage de donner un ordre d'idée de l'erreur apportée par la simplification du modèle. Cette erreur qui reste faible, n'est tout de même pas négligeable et peut s'intégrer dans l'erreur expérimentale liée à l'estimation de l'intensité. C'est ce que nous verrons par la suite avec l'assimilation des données "étrangères" dans la élaboration de la courbe de variation de l'intensité à Paris.

## V-2-5 Choix d'un modèle de présentation des données

Peu de publications d'archéointensité présentent à la fois les valeurs d'intensité et d'inclinaison. C'est pourquoi, afin d'intégrer un maximum de données, nous avons choisi de ramener les valeurs publiées à la latitude de Paris.

En fait, la formule la plus fréquemment utilisée pour présenter des résultats d'archéointensité est le rapport entre l'intensité ancienne estimée,  $F_a$ , et l'intensité développée par le champ dipolaire actuel,  $F_d$ , à la latitude du site (calculé à partir de la formule du VADM, f V-3) :

$$F_d = 31 \cdot \sqrt{4 - 3 \cdot \cos^2(\lambda)} \quad f V-8$$

$F_d$  est exprimée en  $\mu T$  pour un moment dipolaire  $M = 8 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$

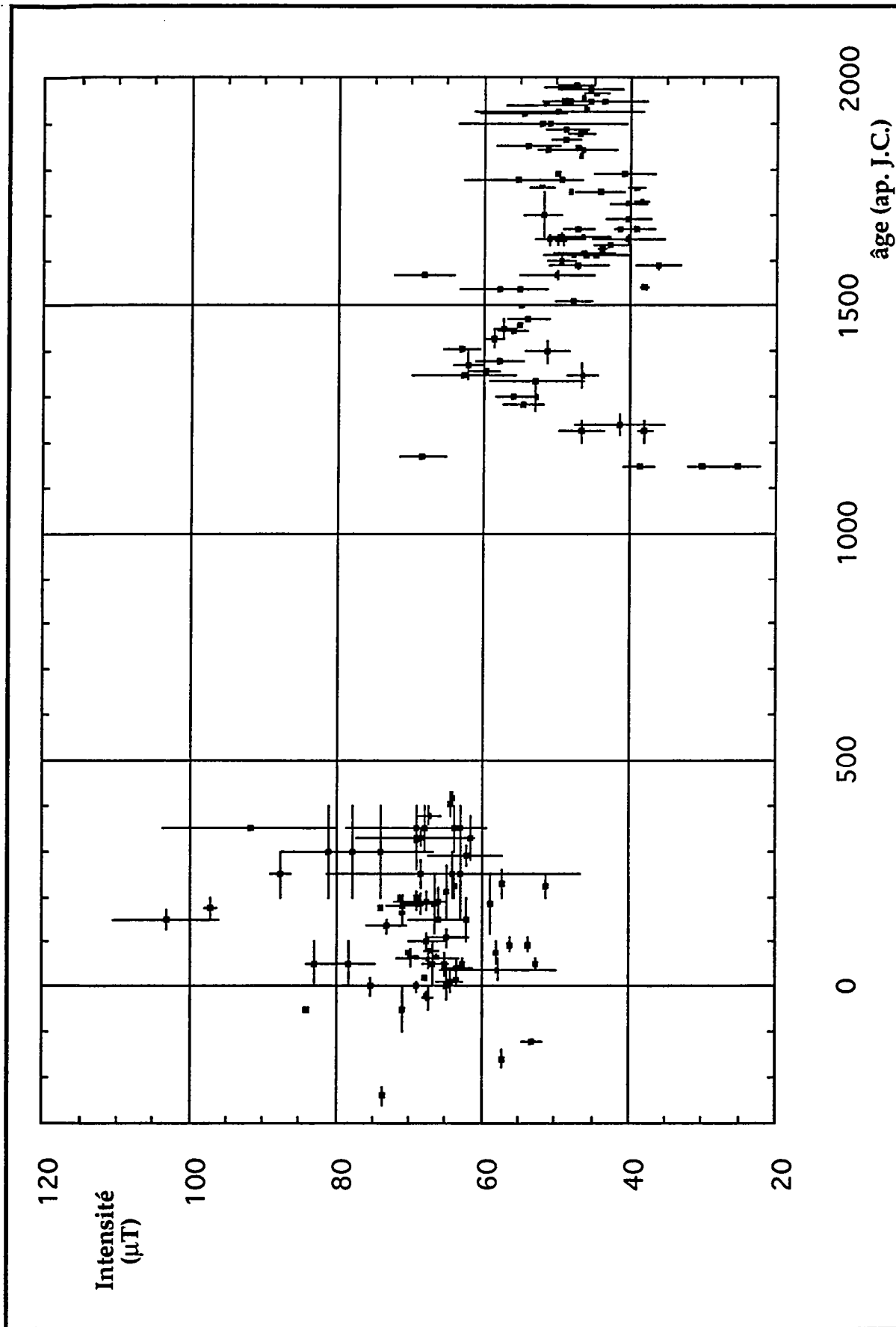


fig. V-5 : données d'intensité ouest-européennes, corrigées de la latitude suivant la formule du dipôle axial centré, présentées avec les barres d'erreurs en âge et intensité.



La formule  $\frac{Fa}{Fd}$  permet de comparer les rapports d'intensité indépendamment de la latitude.

Cette correction est qualifiée de "premier ordre" par Aitken & al. (1989).

### **V-3 Compilation Européenne.**

#### **V-3-1 Données brutes**

Nous allons, dans un premier temps, nous intéresser uniquement aux données provenant de travaux effectués pour les pays limitrophes, contenus dans une zone géographique de coordonnées (60°N, -10°W), (60°N, 15°E), (35°N, -10°W), (35°N, 15°E). Il s'agit principalement de la Grande-Bretagne, des Pays-Bas, de l'Allemagne, de la Belgique, de la Suisse, de l'Italie, et la péninsule ibérique. Nous y avons associé deux données provenant de sites nord-marocains.

Nous avons étudié les données bibliographiques relatives à cette aire. 169 données, dont 162 pour lesquelles nous avons pu retrouver la latitude du site, ont ainsi été réunies uniquement sur cette région. Ces valeurs ont été obtenues soit à partir de l'étude de céramiques de tous types, matériel de construction ou poteries, soit à partir de laves (de l'Etna par exemple). Le détail en est donné par la suite.

Le nombre de données recueillies est faible car nous n'avons pas voulu intégrer les données provenant des travaux sur l'Europe de l'Est (Bulgarie) et l'Est du bassin méditerranéen (Grèce, Crète, ...). Ces régions sont situées trop à l'Est par rapport à notre point d'intérêt immédiat.

Les données sont présentées sans leurs barres d'erreur, en fonction de leur référence bibliographique (fig. V-3) et de leur origine géographique (fig. V-4).

Le premier commentaire concerne l'absence de résultats pour une période historique de 500 ans environ, entre 500 et 1000 ap. J.C. Bien que les données soient présentées telles qu'elles sont estimées à la latitude du site, nous voyons déjà que, durant l'Antiquité, l'intensité du CMT était plus élevée qu'actuellement. Il semble que celle-ci ait même pu atteindre de très faibles valeurs à la fin du Moyen-Âge, 20  $\mu$ T environ, avant d'atteindre un maximum vers 1500 ap. J.C.

#### **V-3-2 Données corrigées de la latitude**

Au lieu d'exprimer la variation de l'intensité du moment dipolaire, nous préférons utiliser notre formule de correction (*f* V-7) et étudier la variation de l'intensité à la latitude de Paris (fig V-5).

Mis à part l'incontournable absence de données entre 500 et 1000, nous pouvons remarquer que certaines données présentent de grandes barres d'erreurs aussi bien en âge qu'en intensité.

La période gallo-romaine présente toujours autant de dispersion. Toutefois il semble qu'un certain nombre de valeurs soit placées dans une gamme d'intensité entre 60 et 75  $\mu\text{T}$ . Comme nous l'avions déjà fait remarquer ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues pour la période de la fin du Moyen-Âge à l'actuel, durant laquelle les valeurs sont majoritairement disposées entre 40 et 60  $\mu\text{T}$ .

Une organisation apparaîtrait à la fin du Moyen-Âge avec des valeurs croissantes jusqu'à l'articulation 1300-1400, où le champ semble avoir connu une décroissance rapide jusque vers 1600. Il aurait ensuite faiblement varié en intensité, jusqu'à l'actuel.

Nous pouvons concevoir trois sources de dispersion :

- l'inclinaison de l'axe du dipôle qui n'est pas prise en compte dans le calcul,
- les composantes non dipolaires du champ magnétique terrestre,
- les erreurs, lors de l'estimation de l'intensité et de l'âge.

L'erreur expérimentale, lors de la détermination de l'intensité, est sans doute une cause majeure de la dispersion observée. Nous allons donc nous intéresser de plus près aux conditions expérimentales des procédures d'acquisition des données que nous avons réunies.

## **V-4 Pondération des données.**

### **V-4-1 Présentation de la pondération**

Nous avons donc examiné d'un peu plus près les données que nous utilisons. Nous en avons profité pour établir une classification des résultats, une pondération, effectuée à partir des réponses apportées aux questions suivantes :

Quelle est la méthode utilisée ?

- on préférera les méthodes avec des chauffes progressives de type Thellier-Thellier (1959) et ses dérivées (Coe, 1967). D'abord parce qu'elles permettent toujours de conserver une trace des rapports ARN/ATR avant une éventuelle évolution, ensuite parce que les processus utilisés sont les plus proches de ceux mis en jeu lors de l'acquisition de l'ARN (aimantation thermorémanente, acquise progressivement dans un champ "faible", d'intensité inférieure à 100  $\mu\text{T}$ ). Les contrôles de l'évolution sont bien sûr pris en compte (test d'acquisition d'ATR partielle de Thellier par exemple).

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, les méthodes utilisant une chauffe unique supérieure à la température de Curie (du type Shaw 74 et ses dérivés) sont discutables. Les hautes températures atteintes engendrent souvent des modifications de la minéralogie. De plus le pourcentage d'ARN et ATR utilisés pour estimer l'archéointensité sont faible, souvent bien inférieur à

50%. Cette valeur est pour nous, utilisateurs de la méthode Thellier-Thellier, la limite en dessous de laquelle l'estimation est rejetée.

Kono (1978) a proposé une correction permettant d'utiliser certains échantillons ayant évolué. A partir du spectre de désaimantation par CA de la première Aimantation Rémanente Anhystérétique, l'ARA1 (avant la chauffe), et de celui de l'ARA2 (acquise après la chauffe) il calcule un facteur de correction tel que si celui-ci est appliqué aux résultats de désaimantation de l'ARA2, il obtient la courbe de désaimantation de l'ARA1. Ce même facteur est alors appliqué aux valeurs de la désaimantation par CA de l'ATR de laboratoire. Puis le diagramme ARN/ATR est construit avec ces valeurs corrigées. Prudent, Kono reste quand même sur ses gardes quant à la fiabilité de cette méthode, et il se restreint à utiliser les résultats obtenus après correction que lorsque d'autres échantillons de la série donnent des résultats identiques sans avoir évolué.

En exploitant la même idée, la méthode proposée par Rolph & Shaw en 1985 utilise des échantillons présentant plusieurs relations linéaires entre ARA1 et ARA2. La correction est calculée à partir du rapport idéal entre la désaimantation par CA de l'ARA1 et de l'ARA2. Cette correction paraît offrir encore moins de qualité que la méthode de Kono.

Pour comparer ces méthodes il eut été intéressant de pouvoir discuter des pourcentages d'ARN utilisés, mais ces valeurs ne sont pas indiquées dans beaucoup de travaux.

- Les corrections d'anisotropie d'ATR ou d'effet de vitesse de refroidissement sont elles effectuées ? Nous l'avons vu dans les chapitres précédents, ces facteurs de perturbation peuvent entraîner des surestimations non négligeables de l'archéointensité.

- Quel est le type d'objet d'où les échantillons sont extraits, matériel de construction (brique, tuile, etc.) ou poterie (débris de pots, vaisselle, etc.) ? Nous tenons compte de la forme des pièces car elle peut engendrer des effets sur l'aimantation (fourreaux et les tuyaux de pipe étudiés par Games et Baker en 1981).

A ce propos il est rare de trouver des indications sur l'ARN des échantillons, laquelle, quand elle est très élevée ( $ARN > 10 \text{ A/m}$ ) peut engendrer des perturbations d'effets de forme (Lanos 1987).

- Quel est le nombre d'échantillons utilisés, leur provenance (même objet ou objets différents) ?

Le nombre des échantillons joue évidemment un rôle important dans la fiabilité de l'estimation.

A partir de ces critères la pondération suivante a été établie :

Méthode	pMe	Matériel	pMa	Nbre éch.	pN
Thel. + An. + Vref	6	briques, laves	4	5 < n	6
Thel. + An.	5	tuiles	3	5	5
Thel., Shaw 74 + An. + Vref.	4	poterie	2	4	4
Shaw 74 + An.	3	objets à fort risque d'effet de forme (pipes, ...)	1	3	3
Shaw 74	2			2	2
R-S 86, Tan. 80	1			1	1

tableau V-3 : pondération des données. pMe, pondération de la méthode, Méthode, Thel = méthode Thellier-Thellier 59 ou équivalente, avec tests de contrôle, R-S = méthode Rolph & Shaw 1986, Tan = méthode Tanguy 1980, An = correction de l'anisotropie d'ATR, Vref = correction de l'effet de la vitesse de refroidissement, pMa, pondération du matériel utilisé, Matériel, type de matériel utilisé, briques, laves, carreaux, tuiles, poteries, objets à fort risque d'effet de forme, pN, pondération du nombre d'échantillons utilisés, Nbre éch., nombre d'échantillons utilisés.

La pondération finale d'une estimation est effectuée en cumulant les valeurs de p obtenues en fonction de la méthode utilisée, en fonction du matériel utilisé et en fonction du nombre d'échantillons utilisés pour cette estimation. Par exemple pour une estimation utilisant uniquement la méthode de Thellier (pMe = 4) avec trois échantillons (pN = 3) extraits de tuiles (pMa = 3) la pondération finale est 10. Plus cette valeur est élevée et plus la confiance accordée à l'estimation est grande. Les valeurs d'observatoires sont pondérées d'une valeur arbitraire fixée à 20.

#### V-4-2 Travaux concernant la France ou l'Europe de l'Ouest :

##### 1) Méthodes à chauffes progressives

**Thellier-Thellier 1959** : la méthode utilisée est soit la méthode directe à trois recuits (Palais Rihour, Château de Versailles), soit la méthode comportant des paliers progressifs de chauffe (Augst, Carthage, Cluny, Fréjus, Baden, Brugg). Les vitesses de refroidissement sont lentes, et la taille des échantillons prélevés laisse supposer une faible hétérogénéité. Certaines dates ont été corrigées (\*) en fonction de la publication Thellier 1981.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa (μT)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
0	Fréjus	43.4	65	60.5		11	briques	4	4	6	14	11.05	10.81
85	Baden	47.5	68			1	tuile	4	3	1	8		10.84
75 ± 5	Augst, Bâle	47.5	69			1	sole de foyer	4	3	1	8		11.00
175	Bâle	47.5	73	63.5		6	tuiles	4	3	6	13	11.93	11.64
200*	Cluny (Paris)	48.9	69			6	briques	4	4	6	14		10.85
200*	Cluny (Paris)	48.9	71	62.25		6	briques	4	4	6	14	11.79	11.17
1465	Lille	50.6	56	63.15		7	briques	4	4	6	14	9.19	8.67

1750	Versailles	48.8	48	74		2	briques	4	4	2	10	6.88	7.55
1848	Paris	48.9	47.1	66.75			directe				20	7.37	7.41
1885	Paris	48.9	46.3	65.25			directe				20	7.40	7.30
1930	Paris	48.9	45.9	64.58			directe				20	7.40	7.22
1955	Paris	48.9	46.4	64.60			directe				20	7.47	7.30

**Veitch, Hedley, Wagner, 1984** : utilisent des carottes standards, et la méthode Thellier-Thellier avec une première chauffe en champ nul (Coe., 1967). La correction d'anisotropie par calcul du tenseur d'anisotropie d'ATR est appliquée. Les résultats sont annoncés avec une surestimation possible de 5% du fait de l'impossibilité de pratiquer des refroidissements lents. Il n'est pas précisé si des tests de stabilité sont appliqués.

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
		(°)	( $\mu$ T)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
0 $\pm$ 20	Palaja	43.17	71 $\pm$ 3			3	four de tuilier	5	3	3	11		11.84
330 $\pm$ 70	Brugg		68 $\pm$ 8			3	tuiles	5	3	3	11		10.86

**Hedley, Wagner, 1990**: utilisent des petits échantillons de 10x11 mm extraits dans des poteries ou des tessons (excepté une tuile), et la méthode Thellier-Thellier avec une phase en champ nul (Coe, 1967). La correction d'anisotropie par calcul du tenseur d'anisotropie d'ATR est appliquée. Les résultats sont annoncés avec une surestimation possible de 5% du fait de l'impossibilité de pratiquer des refroidissements lents. Un test de stabilité est appliqué à 300°C après chauffe totale. Une évolution de 20% est annoncée comme limite avant rejet de l'échantillon, ce qui semble, à la vue de nos propres expériences, une valeur beaucoup trop élevée pour des terres cuites.

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	( $\mu$ T)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
-240 $\pm$ 20	Rimini	44.1	70.2			2	poterie	5	2	2	9		11.59
-160 $\pm$ 20	Monte San Biaggio	41.3	52.7			2	idem	5	2	2	9		8.97
$\pm$ -50	Cales	41.1	77.3			2	idem	5	2	2	9		13.19
-20 $\pm$ 10	Bram	43.2	63.7			1	idem	5	2	1	8		10.62
17.5 $\pm$ 2.5	Arezzo	43.4	64.1			2	idem	5	2	2	9		10.66
0 $\pm$ 10	Lyon-La Murette	45.9	66.9			6	idem	5	2	6	13		10.83
15 $\pm$ 15	La Graufesenque	44.1	60.6			1	idem	5	2	1	8		10.00
50 $\pm$ 10	La Graufesenque	44.1	50.0			2	idem	5	2	2	9		8.25
50 $\pm$ 10	La Graufesenque	44.1	59.7			2	idem	5	2	2	9		9.85
65 $\pm$ 5	La Graufesenque	44.1	63.0			2	idem	5	2	2	9		10.40
75 $\pm$ 25	La Péniche	46.5	56.6			1	idem	5	2	1	8		9.11
95 $\pm$ 15	La Graufesenque	44.1	51.0			1	idem	5	2	1	8		8.42
95 $\pm$ 15	La Graufesenque	44.1	53.5			2	idem	5	2	2	9		8.83
165 $\pm$ 25	Lezoux (Habilis)	45.8	68.8			2	idem	5	2	2	9		11.16
185 $\pm$ 65	La Graufesenque	44.1	56.1			1	idem	5	2	1	8		9.26
185 $\pm$ 65	La Graufesenque	44.1	63.3			1	idem	5	2	1	8		10.43
190 $\pm$ 10	Lezoux	45.8	65.6			1	idem	5	2	1	8		10.64
190 $\pm$ 30	Lezoux (Pottaci)	45.8	64.1			2	idem	5	2	2	9		10.39
210 $\pm$ 60	Rheinzabern	49.1	65.0			2	idem	5	2	2	9		10.19
225 $\pm$ 25	Gueugnon	46.6	62.2			1	idem	5	2	1	8		10.01
225 $\pm$ 25	Engelhalbinsel	46.9	50.1			2	idem	5	2	2	9		8.04

230 ± 30	Baden	47.5	56.5			3	idem	5	2	3	10		9.00
325 ± 25	Lyon	45.9	67.0			1	idem	5	2	1	8		10.85
330 ± 20	L'Estrade	43.3	64.6			1	idem	5	2	1	8		10.80
350 ± 50	Lezoux	45.8	65.7			2	idem	5	2	2	9		10.65
350 ± 50	Sézegnin	46.1	61.3			1	idem	5	2	1	8		9.91
405 ± 25	Carlino	45.8	62.4			1	tuile	5	3	1	9		10.12
415 ± 15	Portout	45.8	62.0			2	poterie	5	2	2	9		10.06

**Barbetti, 1976** : Les objets utilisés proviennent du site très controversé de Glozel (France, 46° de latitude). Beaucoup de ces objets sont de facture douteuse, surtout les tablettes. Ces mesures ne seront pas utilisées ici.

**Weaver, 1966** : utilise des morceaux de briques et tuiles, et la méthode Thellier-Thellier avec une phase en champ nul (Coe., 1967), en atmosphère azotée (favorable à des phénomènes de réduction d'après nos expériences sur les terres cuites). Un test de stabilité est appliqué à 455°C après chauffe totale. Les évolutions sont élevées, certains résultats sont toutefois utilisés (évolution ~ à 10%) .

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	(μT)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
250 ± 50	Northleigh	52.0	65.8 ± 17.3			2	tuile	4	3	2	9		10.06
350 ± 50	Hampstead Marshall	51.4	70.6 ± 9.6			1	tuile	4	3	1	8		10.85
1350	Boston	52.6	64.8 ± 7.2			1	brique	4	4	1	9		9.85
1500	Christchurch	51.8	56.2 ± 1.9			1	carreau	4	3	1	8		8.60
1753	Norfolk	52.7	45.6 ± 3.4			1	brique	4	4	1	9		6.93
1900	Sheffield	53.4	54.2 ± 11.5			1	brique	4	4	1	9		8.18
300 ± 100	Alfrick	52.2	83.5 ± 6.24			7	tuile	4	3	6	13		12.74
300 ± 100	Winterton	54.0	81.4 ± 2.4			2	tuile	4	3	2	9		12.22
300 ± 100	Wroxeter	52.9	76.7 ± 7.2			3	tuile et briques	4	4	3	11		11.63

**Walton, 1977** : utilise de petits échantillons, de diamètre 3 mm, mesurés grâce à l'emploi d'un cryogénique. La chauffe a lieu par petits paliers. Walton trouve en comparant ses résultats avec ceux des autres chercheurs (Barbetti, Shaw) une sous-estimation de l'ordre de dix pour-cent. Aucun renseignement n'est fourni sur les corrections d'anisotropie ou de vitesse de refroidissement (laquelle est probablement rapide, vu la taille des échantillons, et rentre peut être en compte dans les sous-estimations).

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	(μT)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
250 ± 100	?	?	65			2	poterie	4	2	2	8		
250 ± 100	Barnsley	54.3	66			2	1 tuile	4	3	2	9		9.89
330 ± 50	Hampstead Marshall	51.4	63			1	tuile	4	3	2	10		9.68
1290 ± 20	?		55			1	poterie	4	2	1	7		
1300 ± 30	St Peter's	51.5	54			2	tuiles	4	3	2	9		8.29
1530	?		51			1	tuile	4	3	1	8		

**Boyd, 1986** : utilise de petits échantillons, de diamètre 4 mm, mesurés grâce à l'emploi d'un cryogénique. La chauffe est effectuée par paliers progressifs sans retour obligatoire à 20°C. Des tests de stabilité sont effectués, le seuil de tolérance étant fixé à 7%. Pas d'indications quant à l'anisotropie d'ATR. Les refroidissements sont rapides car l'inertie thermique est faible. Ne parle pas de corrections de vitesse de refroidissement.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
1511	Cambridge	52.1	49.0 $\pm$ 2.5			3	briques	4	4	3	11		7.48
1543	Cambridge	52.1	39.2 $\pm$ 0.5			3	briques	4	4	3	11		5.98
1611	Cambridge	52.1	45.8 $\pm$ 1.0			3	briques	4	4	3	11		6.99
1624	Cambridge	52.1	45.0 $\pm$ 0.6			3	briques	4	4	3	11		6.87
1670	Cambridge	52.1	40.3 $\pm$ 2.5			3	briques	4	4	3	11		6.15
1725	Cambridge	52.1	41.5 $\pm$ 2.5			3	briques	4	4	3	11		6.34
1758	Cambridge	52.1	40.3 $\pm$ 1.0			3	briques	4	4	3	11		6.15

**Aitken & al., 1988** : utilise des échantillons, de diamètre 3 mm, mesurés grâce à l'emploi d'un cryogénique. La méthode employée est équivalente à celle de Thellier-Thellier avec la deuxième chauffe en champ nul. Les corrections d'anisotropie et de vitesse de refroidissement sont effectuées.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
1832	Oxford	51.5	44.6			1	brique	6	4	1	11		7.34

**Laboratoire de Rennes 1995** : à ces valeurs nous rajoutons nos propres résultats. Nous rappelons que nous avons utilisé la méthode originale de Thellier et Thellier 1959, en appliquant de surcroît les corrections d'anisotropie d'ATR et de vitesse de refroidissement. Nous avons utilisé plusieurs échantillons par lots afin d'améliorer la représentativité statistique.

Les âges sont ceux réactualisés présentés dans les chapitre III et IV.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
-15 $\pm$ 65	Toulouse	43.6	61.5 $\pm$ 2.8	64.0 $\pm$ 2.5		8	briq.	6	4	6	16	10.0	10.15
20 $\pm$ 40	Toulouse	43.6	60.1 $\pm$ 2.0	61.0 $\pm$ 2.0		8	briq.	6	4	6	16	10.1	10.06
75 $\pm$ 25	Oisseau	48.8	67.1 $\pm$ 4.2	63.5 $\pm$ 1.5		8	briq.	6	3	6	15	11.0	10.61
185 $\pm$ 35	Luxeuil	47.8	70.1 $\pm$ 2.3	58.5 $\pm$ 2.5		8	briq.	6	4	6	16	12.2	11.31
240 $\pm$ 30	Fréhel	48.7	68.3 $\pm$ 2.6	67.0 $\pm$ 1.0		6	briq.	6	3	6	15	10.6	10.63
330 $\pm$ 30	Guignen	47.9	63.3 $\pm$ 3.1	57.5 $\pm$ 1.0		4	briq.	6	4	4	14	11.2	10.27
380 $\pm$ 20	St Malo	48.7	67.0 $\pm$ 1.5	61.0 $\pm$ 1.5		8	briq.	6	3	6	15	11.3	10.54
1370 $\pm$ 30	Olivet	48.0	61.5 $\pm$ 2.0	52.5 $\pm$ 1.5		9	briq.	6	3	6	15	11.6	9.87
1435 $\pm$ 35	Toulouse	43.6	55.4 $\pm$ 1.4	53.0 $\pm$ 2.5		10	briq.	6	4	6	16	10.4	9.55
1425 $\pm$ 25	Toulouse	43.6	54.2 $\pm$ 1.1	54.0 $\pm$ 2.0		11	briq.	6	4	6	16	10.0	9.13
1700 $\pm$ 50	Durtal	47.7	51.2 $\pm$ 2.5	75.0 $\pm$ 3.0		9	briq.	6	4	6	16	7.5	8.20

## Lots de Sallèles-d'Aude

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
0 $\pm$ 30	11salf10	43.2	60.7 $\pm$ 1.8	62.5 $\pm$ 1.8	0.2 $\pm$ 3.9	11	briq.	6	4	6	16	10.07	10.27
70 $\pm$ 20	11salf12	43.2	65.9 $\pm$ 1.5	57.7 $\pm$ 1.2	-1.6 $\pm$ 2.2	12	briq.	6	4	6	16	11.94	11.29
130 $\pm$ 30	11salf13	43.2	61.1 $\pm$ 2.9	56.7 $\pm$ 1.0	-5.1 $\pm$ 1.8	11	briq.	6	4	6	16	10.96	10.22
150 $\pm$ 30	11salf15	43.2	63.7 $\pm$ 2.4	55.9 $\pm$ 1.7	-5.6 $\pm$ 3.0	9	briq.	6	4	6	16	11.69	10.74
210 $\pm$ 20	11salf3	43.2	63.6 $\pm$ 2.3	56.1 $\pm$ 1.7	0.2 $\pm$ 3.0	10	briq.	6	4	6	16	11.84	11.11
215 $\pm$ 20	11salf9	43.2	65.2 $\pm$ 2.9	56.9 $\pm$ 2.0	0.3 $\pm$ 3.6	11	briq.	6	4	6	16	11.90	11.21
265 $\pm$ 30	11salf7	43.2	58.7 $\pm$ 5.0	58.5 $\pm$ 2.3	-2.8 $\pm$ 1.5	18	briq.	6	4	6	16	10.2	9.8
310 $\pm$ 30	11salf14	43.2	64.6 $\pm$ 1.6	56.5 $\pm$ 2.1	-3.3 $\pm$ 3.8	12	briq.	6	4	6	16	11.32	10.73
310 $\pm$ 30	11salf8	43.2	64.6 $\pm$ 2.5	56.5 $\pm$ 2.8	-2.8 $\pm$ 5.1	9	briq.	6	4	6	16	11.44	10.65

**Kovacheva, Pares, Jordanova, Karloukovski, 1995** : à l'étude d'un four gallo-romain espagnol sont rajoutés deux résultats obtenus pour l'étude de deux sites marocains. La détermination de l'intensité utilise la méthode Thellier et Thellier 1959, et tient compte des problèmes liés à l'anisotropie d'ATR.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
75 $\pm$ 25	Calahorra	42.3	60.9 $\pm$ 0.6	58.4 $\pm$ 2.1	-0.8	8	briq.	5	4	6	15	10.6	10.3
-50 $\pm$ 50	Al Kuass	35.5	61.1			3		5	2 ?	3	10		11.1
150 $\pm$ 50	Dchar Jdid	35.5	53.6			2		5	2 ?	2	10		9.78

## 2) Méthodes à chauffe unique

**Shaw, 1974** : Les exemples montrent un échantillon pour lequel le pourcentage d'ARN et d'ATR, utilisé pour estimer l'intensité, est à peu près égal à 10 % de l'ARN et de l'ATR total. La taille des échantillons n'est pas précisée. Aucune correction d'anisotropie d'ATR ou d'effet de la vitesse de refroidissement n'est effectuée.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
150	Stibington	52.2	68 $\pm$ 4			3	poterie	2	2	3	7		10.37
350	Hampstead Marshall	51.5	94 $\pm$ 12			5	tuile	2	3	5	10		14.43
1356	Boston	52.9	62 $\pm$ 2			3	tuile	2	3	3	8		9.40
1900	Sheffield	53.4	53 $\pm$ 1			3	brique	2	4	3	9		8.00

**Shaw, 1979** : La méthode est la même que précédemment avec, rajoutée à la fin de la désaimantation par CA, une désaimantation thermique. Sans corrections.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
-25 $\pm$ 25	près Glozel	46	65.5 $\pm$ 0.7			1	sigillée	2	2	1	5		10.60
50 $\pm$ 50	près Glozel	46	64.8 $\pm$ 1.5			3	sigillée	2	2	3	7		10.49
37.5 $\pm$ 22.5	près Glozel	46	56.2 $\pm$ 7.9			2	sigillée	6	6	6	6		9.10
135 $\pm$ 15	près Glozel	46	71.0 $\pm$ 2.7			2	sigillée	2	2	2	6		11.50



150 ± 20	près Glozel	46	100.3 ± 7.2			1	sigillée	2	2	1	5		16.23
175 ± 25	près Glozel	46	94.3 ± 0.8			2	sigillée	2	2	2	6		15.26

**Games, Baker, 1981** : méthode de shaw 1974. Les échantillons sont taillés pour un diamètre de 2.5 cm, mais l'épaisseur n'est pas précisée. Les corrections d'anisotropie et de vitesse de refroidissement sont effectuées.

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	(μT)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
1645 ± 10	Rainford	53.5	51 ± 2			2	pipe	4	1	2	7		7.69
1645 ± 10	Rainford	53.5	52 ± 1			2	poterie	4	2	2	8		7.84
1645 ± 10	Rainford	53.5	42 ± 5			3	pipes	4	1	3	8		6.33

**Games, Davey, 1981** : méthode de Shaw 1974. Les corrections d'anisotropie et de vitesse de refroidissement sont effectuées.

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	(μT)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
1150	Hen Domen	52.6	31 ± 2			1	poterie	4	2	1	7		4.71
1150	Hen Domen	52.6	40 ± 2			1	poterie	4	2	1	7		6.08
1150	Hen Domen	52.6	26 ± 3			1	poterie	4	2	1	7		3.95
1225 ± 25	Hen Domen	52.6	48 ± 2			1	poterie	4	2	1	7		7.30
1225 ± 25	Carrickfergus	54.7	49 ± 3			1	poterie	4	2	1	7		7.32
1225 ± 25	Carrickfergus	54.7	40 ± 1			1	poterie	4	2	1	7		5.97
1240 ± 20	Okehampton castle	50.7	42 ± 6			1	poterie	4	2	1	7		6.49
1302 ± 18	Newenham Abbey	?	53 ± 2			1	tuile	4	3	1	8		
1350 ± 25	Hen Domen	52.6	48 ± 2			1	poterie	4	2	1	7		7.30
1400 ± 25	Hen Domen	52.6	53 ± 3			1	poterie	4	2	1	7		8.06
1473	Gt Linford	51.3	55 ± 3			1	carreau	4	3	1	8		8.46
1567 ± 8	Farnborough hill	51.2	51 ± 5			1	tuile	4	3	1	8		7.85
1588 ± 8	Bristol	51.3	37 ± 3			1	poterie	4	2	1	8		5.69
1588 ± 8	Bristol	51.3	48 ± 4			1	poterie	4	2	1	7		7.38
1600 ± 10	Exeter	50.4	50 ± 2			1	poterie	4	2	1	7		7.75
1645 ± 10	Rainford	53.5	53 ± 2			1	pipe	4	1	1	6		7.99
1651 ± 9	Exeter	50.4	50 ± 2			1	poterie	4	2	1	7		7.75
1731 ± 3	Liverpool	53.3	40 ± 1			1	poterie	4	2	1	7		6.04

**Evans, 1986** : méthode de shaw 1974, modifiée (correction selon Kono; 1978). Aucune correction d'anisotropie ou de vitesse de refroidissement. Aucune indication quant à la vitesse de refroidissement.

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	(μT)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
250 ± 50	sud Italie	40.0	79.7 ± 1.3 corr			3	four	2	4	3	9		13.77
50 ± 50	sud Italie	40.0	71.3 ± 3.7 corr			5	four	2	4	5	11		12.32
50 ± 50	sud Italie	40.0	75.3 ± 1.2 corr			4	four	2	4	4	10		13.01

**Evans, 1991** : méthode de shaw 1974, modifiée (Kono; 1978). Corrections de vitesse de refroidissement calculées pour deux échantillons, +2% et -0.7%, mais non appliquées). Les échantillons sont de taille standard (25 x 22 mm).

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	( $\mu$ T)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
08/79	Pompeii	40.4	61.2 $\pm$ 1.0	59.1 $\pm$ 1.7		6	four	2	4	6	12	10.59	10.53

**Rolph. Shaw, 1986** : méthode Shaw 1974, modifiée Rolph & Shaw 1985. Correction d'anisotropie (le champ de Laboratoire est orienté afin que l'ATR soit parallèle à l'ARN). Le nombre minimum d'échantillons utilisés est de deux, mais habituellement de trois. Comme nous n'en connaissons pas le nombre exact pour chaque lot, nous décidons arbitrairement de le fixer à trois.

age	site	lat.	Fa	Inc.	Dec.	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM	VADM
(AD)		(°)	( $\mu$ T)	(°)	(°)							10 <sup>22</sup>	10 <sup>22</sup>
1169	etna	37.5	60.4 $\pm$ 3.1	55.6 $\pm$ 3.4	17.4		lave	2	4	3	9	10.93	10.75
1284	etna	37.5	48.2 $\pm$ 2.7	50.2 $\pm$ 5.0	10.6		lave	2	4	3	9	9.30	8.58
1334	etna	37.5	46.6 $\pm$ 6.4	49.1 $\pm$ 4.0	6.5		lave	2	4	3	9	9.11	8.29
1408	etna	37.5	55.6 $\pm$ 2.4	47.1 $\pm$ 6.6	3.7		lave	2	4	3	9	11.11	8.90
1444	etna	37.5	49.4 $\pm$ 2.1	57.3 $\pm$ 1.6	2.0		lave	2	4	3	9	8.75	8.79
1536	etna	37.5	51.0 $\pm$ 5.6	60.5 $\pm$ 2.8	0.7		lave	2	4	3	9	8.67	9.07
1566	etna	37.5	60.2 $\pm$ 4.1	63.8 $\pm$ 1.9	8.2		lave	2	4	3	9	9.80	10.71
1610	etna	37.5	42.1 $\pm$ 3.2	65.1 $\pm$ 2.2	5.7		lave	2	4	3	9	6.74	7.49
1614	etna	37.5	40.8 $\pm$ 4.1				lave	2	4	3	9		7.26
1634	etna	37.5	37.7 $\pm$ 2.1	65.0 $\pm$ 1.7	-3.2		lave	2	4	3	9	6.04	6.71
1651	etna	37.5	41.0 $\pm$ 3.7	62.2 $\pm$ 4.0	-5.0		lave	2	4	3	9	6.81	7.30
1669	etna	37.5	36.6 $\pm$ 0.7	60.4 $\pm$ 2.9	-3.7		lave	2	4	3	9	6.23	6.51
1689	etna	37.5	35.6 $\pm$ 3.0	64.0 $\pm$ 2.3	-8.6		lave	2	4	3	9	5.78	6.33
1763	etna	37.5	46.0 $\pm$ 1.7	54.2 $\pm$ 2.2	-0.2		lave	2	4	3	9	8.47	8.18
1780	etna	37.5	48.8 $\pm$ 7.5	58.3 $\pm$ 2.5	-1.7		lave	2	4	3	9	8.53	8.68
1792	etna	37.5	36.1 $\pm$ 4.1	57.9 $\pm$ 5.9	-27		lave	2	4	3	9	6.34	6.42
1843	etna	37.5	45.3 $\pm$ 1.3	54.8 $\pm$ 2.0	-14.6		lave	2	4	3	9	8.28	8.06
1853	etna	37.5	47.7 $\pm$ 4.4	55.7 $\pm$ 2.5	-9.8		lave	2	4	3	9	8.61	8.49
1879	etna	37.5	41.3 $\pm$ 1.8				lave	2	4	3	9		7.35
1886	etna	37.5	43.0 $\pm$ 2.9	49.8 $\pm$ 0.9	-9.0		lave	2	4	3	9	8.34	7.65
1923	etna	37.5	48.2 $\pm$ 5.8	50.9 $\pm$ 3.2	-2.8		lave	2	4	3	9	9.23	8.58
1928	etna	37.5	44.0 $\pm$ 11.6				lave	2	4	3	9		7.83
1942	etna	37.5	45.4 $\pm$ 5.5				lave	2	4	3	9		8.08
1947	etna	37.5	38.5 $\pm$ 5.7	49.8 $\pm$ 3.4	0.2		lave	2	4	3	9	7.45	6.85
1949	etna	37.5	40.1 $\pm$ 1.5				lave	2	4	3	9		7.14
1950	etna	37.5	42.6 $\pm$ 3.8	49.3 $\pm$ 3.5	-1.0		lave	2	4	3	9	8.31	7.58
1964	etna	37.5	39.4 $\pm$ 1.6				lave	2	4	3	9		7.01
1974	etna	37.5	40.2 $\pm$ 4.3				lave	2	4	3	9		7.15
1981	etna	37.5	43.5 $\pm$ 2.5	45.6 $\pm$ 2.6	-0.2		lave	2	4	3	9	8.84	7.74
1983	etna	37.5	41.9 $\pm$ 2.4				lave	2	4	3	9		7.46

**Tanguy, 1980** : méthode Tanguy (1980), par chauffages rapides et cumulés des échantillons de lave (3 x 3 x 3 cm) au delà de leur température de Curie, et refroidissement (40-45 mn) dans le champ terrestre. L'ATR à t=0 est obtenue par extrapolation graphique des courbes de temps de chauffe cumulés.

age (AD)	site	lat. (°)	Fa ( $\mu$ T)	Inc. (°)	Dec. (°)	N	mat.	pMe	pMa	pN	pTot.	VDM 10 <sup>22</sup>	VADM 10 <sup>22</sup>
- 122 ?	Catane	37.5	47 ?	51.8		4	lave	1	4	5	10	8.90	8.36
1301 ou 1150 ?	Ischia	40.4	51	47.7	9	3	lave	1	4	4	9	10.13	8.77
1381	Etna	37.5	51	51.1	18.6	6	lave	1	4	7	12	9.74	9.07
1536	Etna	37.5	48.5	56.5	4.8	4	lave	1	4	5	10	8.67	8.63
1610	Etna	37.5	40.5	60.0	3.5	4	lave	1	4	5	10	6.93	7.21
1669	Etna	37.5	41.5	62.5	-3.3	4	lave	1	4	5	10	6.87	7.38
1780	Etna	37.5	43.5	56.7	-14.9	4	lave	1	4	5	10	7.76	7.74
1792	Etna	37.5	44	55.8	-14.2	2	lave	1	4	3	8	7.94	7.83
1843	Etna	37.5	41	53.2	-14.2	4	lave	1	4	5	10	7.64	7.30
1865	Etna	37.5	43	51.9	-9.5	4	lave	1	4	5	10	8.14	7.65
1950	Etna	37.5	43.2	mesure directe							20		7.69

#### V-4-3 Utilisation de la pondération: description du résultat obtenu

D'une manière générale nous pouvons remarquer que les données de fortes pondération sont regroupées, et surtout que les valeurs extrêmes d'intensité sont systématiquement de faible pondération.

Nous allons commenter le résultat de cette pondération en séparant les données sur deux périodes : l'Antiquité ou période gallo-romaine de 0 à 400 ap. J.C., et période "moderne" de 1100 ap. J.C. à l'actuel (fig. V-6).

1- période gallo-romaine : beaucoup de données ont une faible pondération. Ensuite nous voyons surtout des valeurs avec une pondération supérieure à 11. Ces dernières valeurs sont d'ailleurs regroupées, ce qui est de bon augure. L'action de la pondération est significative.

Ces données sont regroupées dans une bande de valeurs: 60-75  $\mu$ T. Un maximum semble être atteint vers la fin du second siècle avec des points centrés autour d'une valeur de 70  $\mu$ T. Nous pourrions grossièrement décrire cette répartition comme constituant une sorte d'accent circonflexe. Le champ aurait donc faiblement varié durant cette période.

2- période 1100 à l'actuel : cette partie présente une durée une fois et demi supérieure à la première. Son interprétation n'est pas facile, car peu de points de forte pondération sont remarquables.

La première partie, qui présenterait une croissance de l'intensité depuis des valeurs faibles, 25  $\mu$ T environ en 1150, vers des valeurs plus élevées, 60  $\mu$ T vers 1380-1400, est de très faible pondération et donc de peu de crédit à nos yeux. Ces données proviennent des travaux de Games et Davey 1981 et ne sont pas recoupées par d'autres auteurs.

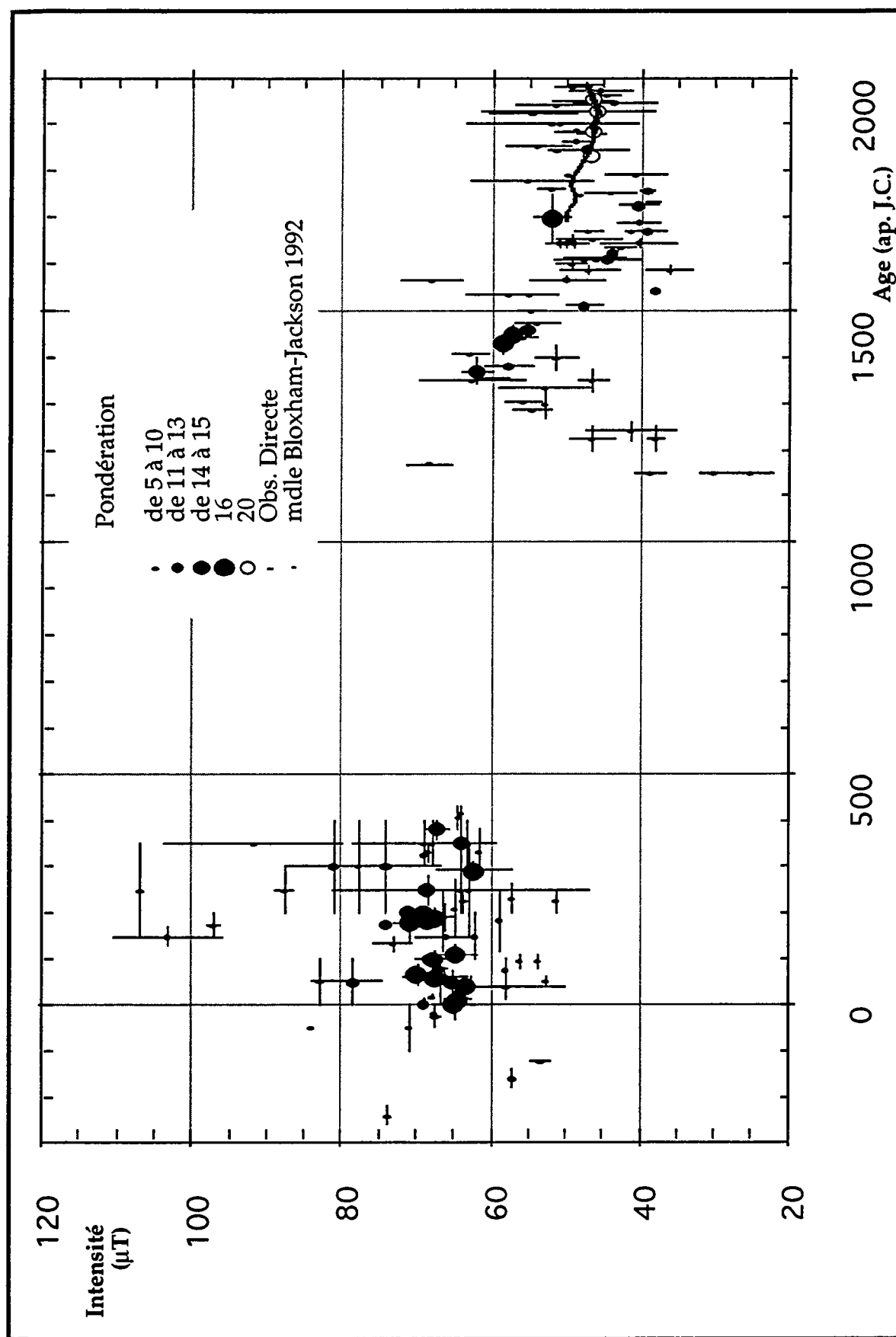


fig. V-6 : données d'intensité ouet-européennes. Présentation de la pondération dont elles sont créditées

Vient ensuite une période de deux siècles, de 1300 à 1500, où le champ aurait connu une décroissance lente de l'intensité, de 61-62  $\mu\text{T}$  à 52,5  $\mu\text{T}$  environ en 1460. Outre quatre estimations à forte pondération (dont trois provenant du travail effectué à Rennes, et une de Thellier et Thellier 1959), quelques estimations de faible pondération s'intègrent dans cette tendance.

L'interprétation des cinq siècles suivants est plus confuse. Seuls deux points de forte pondération sont visibles: un en  $1700 \pm 50$  dont l'intensité a été estimée à Rennes et un situé en 1848, mesure d'observatoire qualifiée de directe sommaire par Thellier et Thellier 1959.

Notre estimation pour  $1700 \pm 50$  est de  $52,1 \pm 2,7 \mu\text{T}$ . en accord avec le modèle Bloxham & Jackson (1992) qui prédit, pour le début du dix-huitième siècle, une intensité à Paris d'environ 49,5  $\mu\text{T}$ .

Toutefois les travaux de Rolph et Shaw 1986, Boyd 1986, Games et Baker 1981, et Games et Davey 1981 (voir fig. V-3). décrivent durant le XVIII<sup>ème</sup> siècle une intensité plus faible centrée autour de la valeur de 40  $\mu\text{T}$ . Rolph et Shaw, 1986, ont réagi à la faiblesse de leurs valeurs. Ces auteurs ont proposé pour explication un phénomène de réfraction de la part des échantillons (il est tout de même surprenant que quatre auteurs obtiennent des résultats convergents sur cette période). Les mêmes auteurs trouvent aussi des valeurs plus élevées plus proches du modèle : Games et Davey 1981, et même Rolph et Shaw 1986. Les données de Tanguy 1980 sont plus élevées que celles de Rolph et Shaw, 1986, alors que le matériel de base étudié est le même dans les deux cas : des laves de l'Etna.

Les écarts entre toutes ces valeurs pourraient s'expliquer par l'existence d'un champ non-dipolaire assez fort à certaines périodes. Toutefois, en l'absence de données directionnelles claires pour chacune de ces études nous ne sommes pas en mesure d'estimer l'importance du champ non-dipôle.

La partie fin 19<sup>ème</sup> - 20<sup>ème</sup> siècle ne pose pas de problèmes d'interprétation du fait de la connaissance des caractéristiques de l'intensité grâce aux mesures directes.

## V-5 Interprétation sommaire des couples intensité-âges

Les données sur l'Europe de l'Ouest étant peu nombreuses, nous complétons notre base de donnée avec :

- les données de Bulgarie,
- de Grèce,
- d'Ukraine,
- du Caucase.

Depuis maintenant près de 20 ans des études d'archéomagnétisme sont poursuivies en Bulgarie par M. Kovacheva et son équipe. Le résultat de ces travaux a été la publication en 1992 de l'ensemble de ces résultats de détermination de la variation de l'inclinaison, de la déclinaison et de l'intensité. Les méthodes d'acquisition des données archéomagnétiques employées par Kovacheva sont classiques et celle-ci utilise la méthode décrite par Thellier et Thellier 1959 pour l'étude de

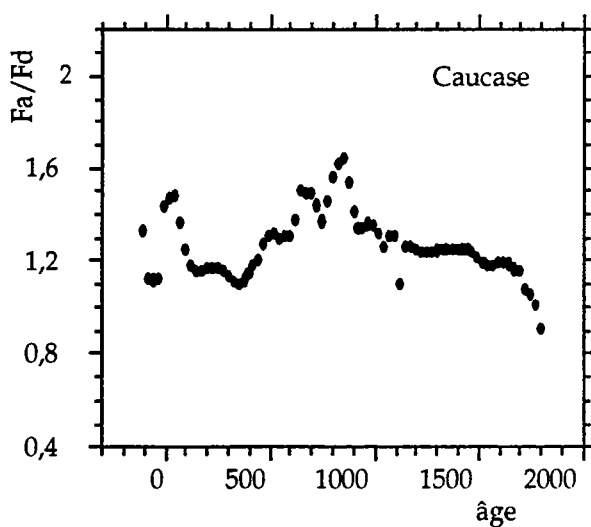
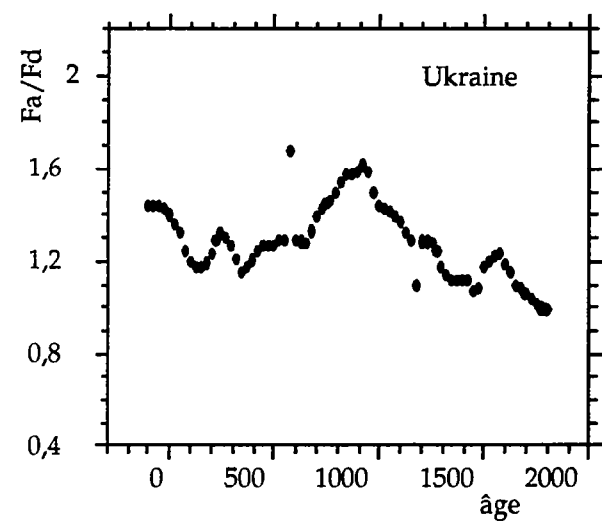
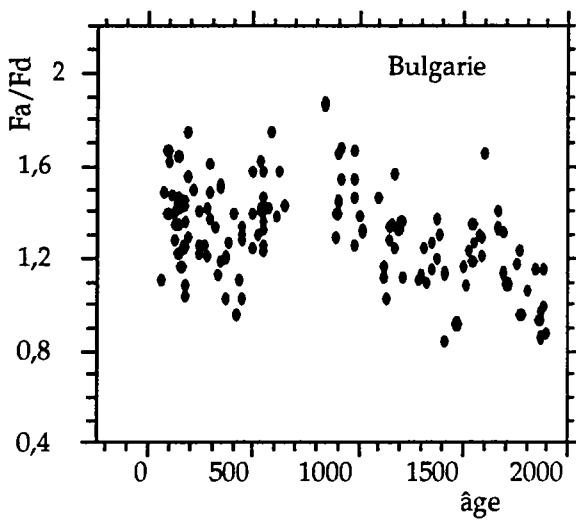
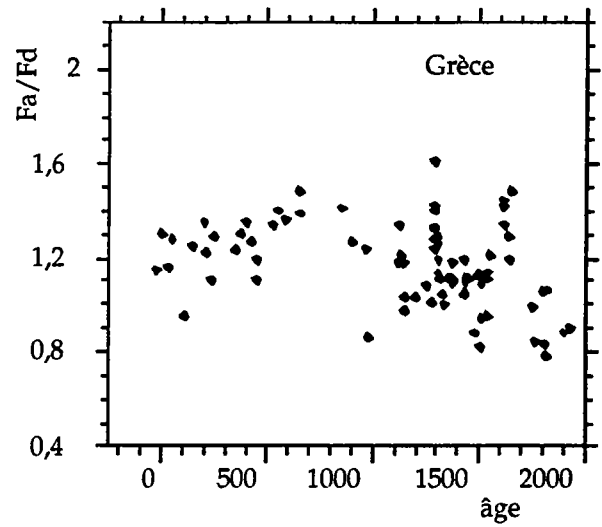
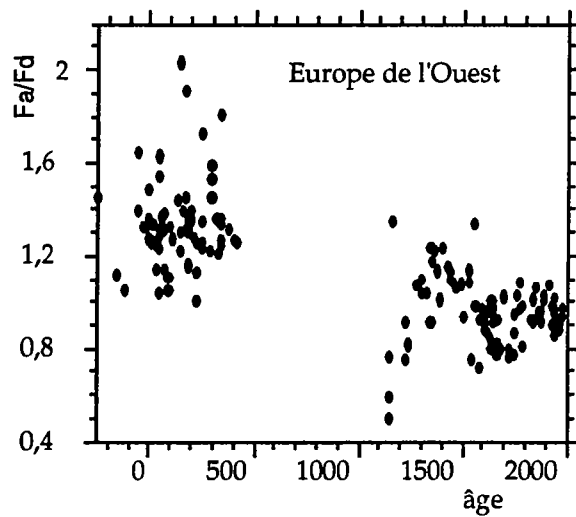


fig. V-7 : données d'intensité présentées suivant le rapport  $Fa/Fd$  (intensité ancienne sur intensité dipolaire), pour l'Europe de l'Ouest, la Grèce (Xanthakis et Liritzis, 1991), la Bulgarie (Kovacheva 1992). Pour l'Ukraine (Kiev) et le Caucase (Gori) il s'agit de données moyennes (fenêtre de 25 ans) publiées par Daly et Le Goff (1996).

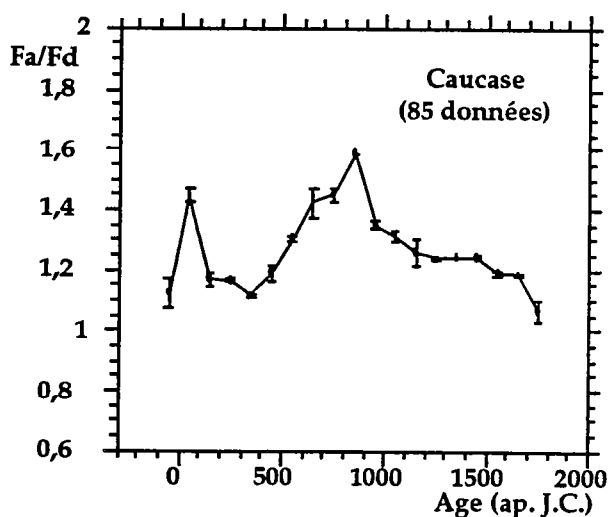
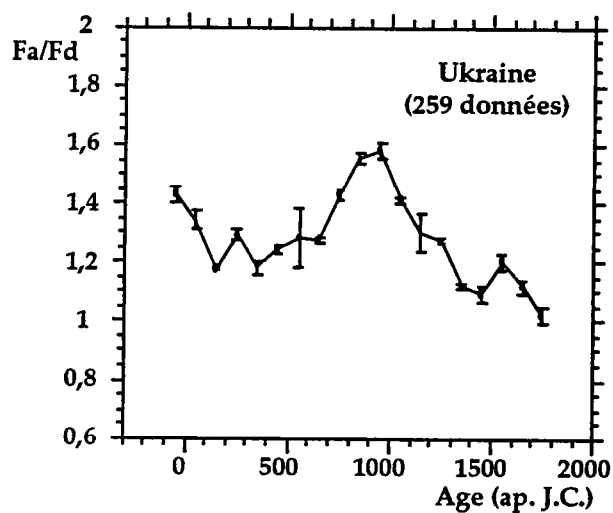
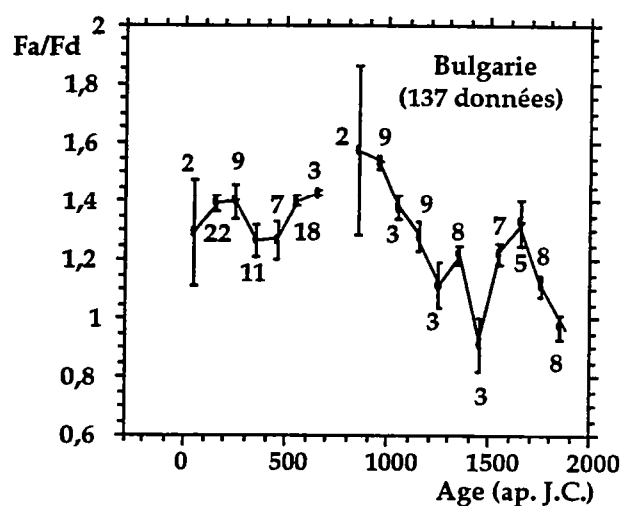
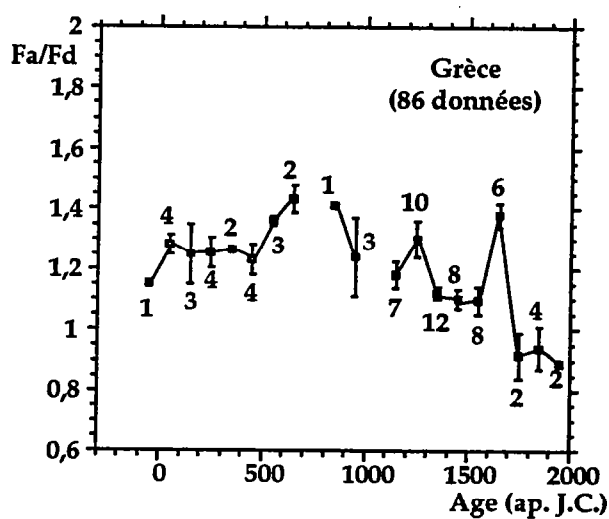
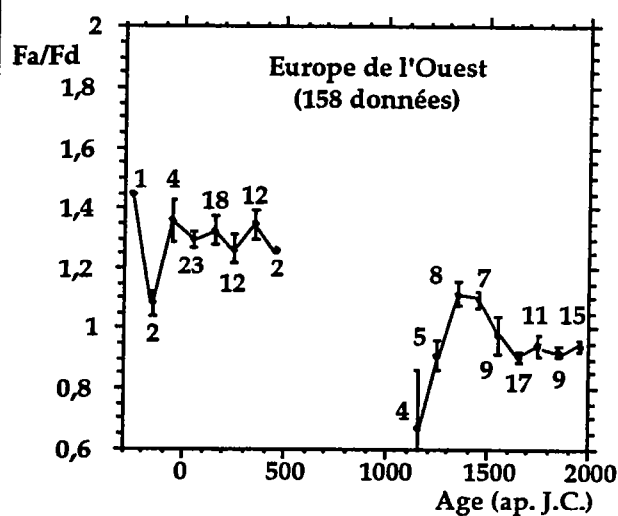


fig. V-8 : moyennes d'intensité sur un intervalle de 100 ans calculées sur les données présentées sur la fig. V-7 (sont indiqués les nombres de points utilisés dans les fenêtres)

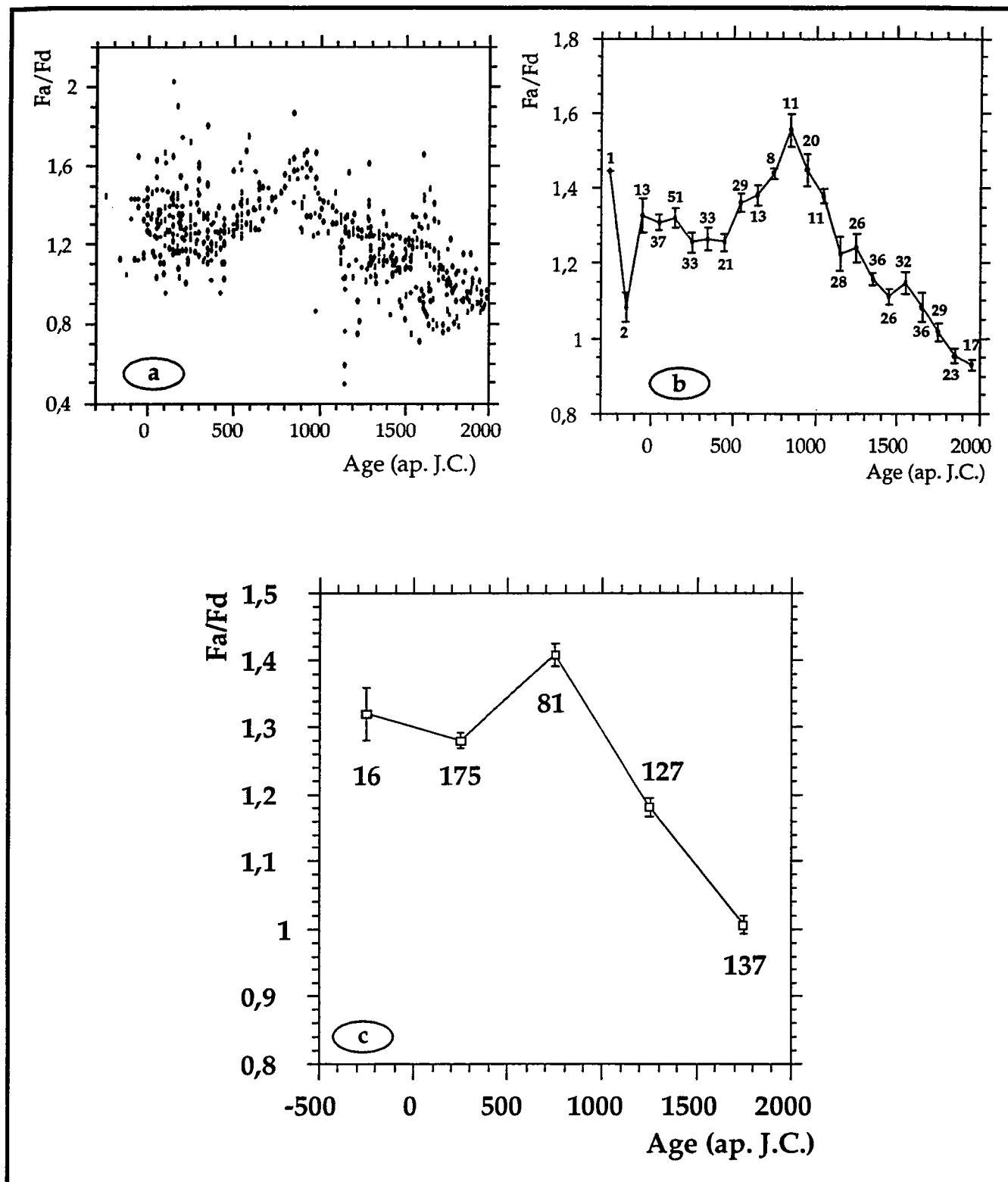


fig. V-9 : regroupement de l'ensemble des données présentées sur la fig. V-7 (V-9-a), intensité moyenne sur une période de 100 ans (V-9-b) et de 500 ans (V-9-c).



l'archéointensité. Lors des derniers travaux il a été tenu compte des problèmes liés à l'anisotropie d'ATR. Du fait de refroidissement lent des échantillons, la surestimation de l'intensité est qualifiée de négligeable (Kovacheva & Toshkov, 1994).

Même si certains renseignements manquent, nombre d'échantillons utilisés par lots, type de matériel employé (fonds de foyers ?), ces données apparaissent de qualité en fonction de l'échelle de pondération précédemment établie.

En 1991 Xanthakis et Liritzis ont publié une analyse des périodes de variation de l'intensité du champ magnétique terrestre en Grèce. Le recueil de données, concentrées sur ce pays, est certes une synthèse des travaux effectués sur la Grèce, mais, en fait, il comprend aussi des valeurs provenant de la Bulgarie et autres pays environnants. Cela signifie donc que le nombre de travaux effectués sur la Grèce, pays qui doit pourtant pouvoir fournir de bonnes datations et pour lequel nombre de chercheurs européens ont concentré leur attention, est encore insuffisant à fournir des renseignements sur 2000 ans (et plus en comptant la période avant J.C.). Sur 86 données représentant la période 0-2000, 13 proviennent de Bulgarie (Kovacheva 1980), 7 de Tchécoslovaquie (Bucha, 1970), le reste, 66 données, provient de travaux sur la Grèce (Aitken et al., 1989, Walton, 1984). Le mode opératoire utilisé pour interpréter la courbe de variation séculaire nous laisse sceptique. Certaines valeurs sont regroupées et moyennées, ceci sans grande justification, d'autres semblent avoir été doublées afin d'être assimilées à deux groupes à la fois.

Les données d'Ukraine et du Caucase proviennent de la compilation publiée par Daly et Le Goff en 1996, basée, entre autre, sur une publication de l'Académie Russe des Sciences (Burlatskaya, 1986). Daly et Le Goff ont extrait 259 données pour l'Ukraine et 83 pour le Caucase, et ont calculé des moyennes pondérées de façon à aboutir à un point tous les 25 ans. Ce sont ces valeurs moyennes que nous utilisons.

L'ensemble de ces données est présenté sur la figure V-7, sous forme de rapport  $f_a/f_d$ . Nous voyons nettement que l'intervalle 500 - 1000 ans, pour lequel nous manquons de données en Europe de l'Ouest, se trouve maintenant beaucoup mieux échantillonné.

Un premier traitement de base a consisté à calculer des moyennes de fenêtres 100 ans (fig. V-8). Les rapports  $f_a/f_d$  sont compris entre 1.6 et 0.7. Pour la zone d'étude, les cinq premiers siècles de notre ère semblent marqués par une faible variation de l'intensité (sauf peut-être en Ukraine). De plus fortes variations sont observées de 600 à 1000 ap. J.C.. Depuis l'intensité semble avoir décru plus ou moins régulièrement jusqu'à l'actuel.

Ces mêmes tendances se retrouvent lorsqu'on calcule des moyennes de fenêtres de 100 ans sur l'ensemble des données réunies (fig. V-9).

Lorsqu'une moyenne de fenêtre de 500 ans est appliquée à toutes ces données de façon à approcher au mieux les variations d'intensité du dipôle uniquement, nous observons principalement une décroissance depuis 1000 ans environ. Ce résultat reste très proche des observations faites par Sennanayake et Mc Elhinny (1982).

## **V-6 Traitement par Spline Cubique**

Bien que nous ayons pu dégager des tendances générales de la variation de l'intensité en Europe, notre objectif reste d'utiliser l'intensité comme outil de datation. Il est pour cela nécessaire d'établir une courbe de référence la plus détaillée et la plus fiable possible.

Pour cela nous allons présenter les démarches d'analyses précédemment effectuées au Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I et introduire une méthode d'analyse basée sur les fonctions splines cubiques.

### **V-6-1 Travaux du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes (UMR 153)**

#### **1) Première analyse des données directionnelles**

La première interprétation (Laubenheimer & Lanos, 1994) de la courbe de variation temporelle de l'inclinaison a été effectuée par un lissage à la main (fig. I-31). Cette tentative présente deux défauts importants :

- il n'y a pas de quantification des erreurs,
- l'enveloppe de confiance à 95% est établie par translation directe de la courbe moyenne et de fait ne tient pas compte de la dispersion en ordonnée des points.

#### **2) Deuxième analyse**

Cette fois le principe de la fenêtre mobile recouvrante (Lanos, 1990) a été appliqué. L'utilisation de la fenêtre permet de calculer un barycentre par lequel doit passer la courbe. A ce point central peut être affectée une incertitude calculée à partir de la dispersion de chaque point contribuant à la fenêtre.

La succession des barycentres et de leur enveloppe de confiance donne l'allure de la courbe et l'incertitude associée (fig. III-5).

Bien que très séduisant et simple d'emploi, cet algorithme présente l'inconvénient de restituer une courbe non lissée, et surtout, il est incapable d'interpoler l'allure de la courbe dans les zones de lacunes de données.

Ces deux méthodes ne donnant pas les résultats espérés, le Laboratoire s'est donc tourné vers la recherche de nouvelles solutions.

## V-6-2 Définition d'un cahier des charges

La procédure suivie ici, qui repose sur les travaux de Wakba (1190) et Green et Silvermann (1994), est actuellement en cours d'élaboration au Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I par P. Lanos.

Si l'on résume, nous pouvons dire que les qualités demandées à un outil mathématique d'interprétation de données expérimentales reliant l'évolution d'un phénomène (ici la déclinaison, l'inclinaison, ou l'intensité) avec le temps, sont :

**Q1** - la possibilité d'obtenir une courbe lissée  $g(t)$  tenant compte de tous les points,

**Q2** - une enveloppe de confiance associée, calculée en fonction du nombre de points contribuant à la courbe, en fonction de la dispersion des points les uns par rapport aux autres, et en fonction de l'erreur (en âge et valeur estimée) associée à chaque point.

Le développement de **Q1** peut aussi s'exprimer comme suit :

**d1** - faire passer la courbe par un maximum de points,

**d2** - lisser les points pour éviter les irrégularités locales ou dispersions déjà citées.

D'un point de vue mathématique,

**d1** peut être quantifié par l'écart entre la courbe calculée, et les points expérimentaux. Cet écart peut être exprimé par l'utilisation du calcul des moindres carrés qui s'écrit :

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - g(t_i))^2 \quad f. V-9$$

$Y_i$  étant le point observé en  $t_i$  (diagramme  $Y_i-t_i$ ) et  $g(t_i)$  étant la valeur calculée en  $t_i$  d'après l'équation de la courbe  $g(t)$ .

Le second développement, le lissage, peut être quantifié par une quantité reliée à la courbure de la courbe proposée, soit par :

$$\int_a^b \{g''(t)\}^2 dt \quad f. V-10$$

Afin de répondre à d1 et d2 on cherche la courbe qui passe au mieux par les points et qui lisse au mieux la courbe. Pour cela on cherche à minimiser le critère suivant :

$$S(g) = \sum_i^n (Y_i - g(t_i))^2 + \alpha \int_a^b g''(t)^2 dt \quad f. V-11$$

le coefficient  $\alpha$  (toujours positif) mesure la part relative donnée au terme de lissage par rapport au terme d'ajustement.

Ainsi un  $\alpha$  égal à 0, implique une fonction passant par tous les points, et à l'inverse une valeur élevée de  $\alpha$  provoque un lissage important de la courbe.

### V-6-3 Fonction Spline Cubique

On démontre que  $S(g)$  est minimisée par les fonctions de type spline cubique (SC).

Les caractéristiques de ces fonctions sont :

- sur chaque intervalle de la courbe la fonction  $g$  est un polynôme cubique,
- $g$  et ses dérivées première et seconde,  $g'$  et  $g''$ , sont continues aux points  $t_i$ , appelés noeuds dans ce cas.

Si de plus  $g'' = g''' = 0$  en  $a$  et  $b$ ,  $a$  et  $b$  étant les extrémités telles que  $a < t_1 < \dots < t_n < b$ , alors la SC est qualifiée de spline cubique naturelle, SCN ou NCS en anglais.

L'atout principal de ce type de fonction SC est de lisser la courbe de variation (nous verrons comment par la suite), et d'interpoler l'allure de la courbe entre deux points successifs.

### V-6-4 Application de la fonction spline cubique

Avant de décrire le calcul de la fonction nous devons présenter quelques particularités du calcul.

Il n'existe pas de doubles points à un  $t_j$  déterminé. Si tel n'est pas le cas, il faut prévoir un traitement de ces points dits "en cravate". L'utilisation judicieuse de fenêtres permet une telle réduction.

Les valeurs en abscisse, la base de temps pour nous, sont ensuite réduites entre 0 et 1.

Les noeuds peuvent être dotés d'une pondération  $W$ . Nous verrons par la suite l'imbrication de la pondération avec le calcul des points en cravate.

En résumé chaque point est caractérisé par son abscisse  $t_i$ , son ordonnée  $Y_i$ , et sa pondération  $W_i$ .

Comment se déroule le calcul de la spline?

La spline peut être décrite soit par les 4 coefficients polynomiaux de chaque intervalle,  $a_i, b_i, c_i, d_i$ , tels que

$$g(t) = d_i(t-t_i)^3 + c_i(t-t_i)^2 + b_i(t-t_i) + a_i,$$

soit par la description des vecteurs  $g$  et  $\gamma$  tels que

$g_i = g(t_i)$ , valeur de la spline au noeud  $t_i$ , (f V-12)

$\gamma_i = g''(t_i)$ , valeur de la courbure au noeud  $t_i$ . (f V-13)

Cette dernière possibilité est choisie pour les possibilités de simplification de calcul informatique.

#### V-6-5 Méthode préconisée par Green et Silvermann (1994) et Reinsch (1967)

Dans le cadre de l'utilisation de données pondérées (ce qui est notre cas), Green et Silvermann préconisent l'usage des termes et de la méthode de calcul suivants :

- établir deux matrices bandes  $Q$  et  $R$  calculées à partir des intervalles  $h_i$  entre chaque noeud  $t_{i+1}$  et  $t_i$

$$h_i = t_{i+1} - t_i \quad (f V-14)$$

$Q$ , de dimension  $n.(n-2)$  d'éléments  $q_{i,j}$  ( $2 \leq j \leq n-1$ ), est caractérisée par les relations suivantes :

$$q_{j-1,j} = \frac{1}{h_{j-1}} \quad (fV-15)$$

$$q_{j,j} = \frac{1}{h_{j-1}} - \frac{1}{h_j} \quad (fV-16)$$

$$q_{j+1,j} = \frac{1}{h_j} \quad (fV-17)$$

De même  $R$ , matrice symétrique de dimension  $(n-2)(n-2)$  d'éléments  $R_{i,j}$ , ( $i$  et  $j$  variant de 2 à  $(n-1)$ ), est calculée à partir des formules suivantes :

$$R_{i,j} = \frac{1}{3}(h_{i-1} + h_i) \quad i \text{ variant de } 2 \text{ à } (n-1) \quad (fV-18)$$

$$R_{i,j+1} = R_{i+1,i} = \frac{1}{6} h_i \quad i \text{ variant de } 2 \text{ à } (n-2) \quad (fV-19)$$

$$R_{i,j} = 0 \quad \text{pour } (i-j) \geq 2 \quad (fV-20)$$

Etant uniquement liées aux valeurs  $h_i$ , aisées à obtenir, ces deux matrices sont rapidement calculables

Dans le cadre d'une SCN il est possible d'écrire

$$g(t_i) = Y_i \quad (fV-21)$$

nous pouvons alors calculer la formule suivante :

$$(Q^T.Y)_i = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{h_i} - \frac{Y_i - Y_{i-1}}{h_i} \quad (fV-22)$$

formule qui va nous servir par la suite.

Pour une valeur  $\alpha$  donnée, on peut calculer la formule suivante :

$$R + \alpha.Q^T \cdot \frac{1}{W} \cdot Q \quad (fV-23)$$

formule simplifiable pour le calcul informatique.

De la connaissance de  $f V-23$  et  $f V-24$  il est possible de déduire la valeur de  $\gamma$  à partir de la relation suivante :

$$(f V-22) * \gamma = (f V-23) \quad (f V-24)$$

Une fois  $\gamma$  déterminé il est possible de déterminer  $g$  par la formule :

$$g = Y - \alpha \cdot \frac{1}{W} \cdot Q \cdot \gamma \quad (f V-25)$$

La détermination de  $g$  et  $\gamma$  permet de construire la courbe de la spline cubique en tout point  $t$  par application de la formule suivante :

$$g(t) = \frac{((t-t_i) \cdot g_{i+1} + (t_{i+1}-t) \cdot g_i)}{h_i} - \frac{1}{6} \cdot (t-t_i) \cdot (t_{i+1}-t) \cdot \left( \gamma_{i+1} \cdot \left( 1 + \frac{t-t_i}{h_i} \right) + \gamma_i \cdot \left( 1 + \frac{t-t_i}{h_i} \right) \right)$$

## V-6-6 Calcul du meilleur alpha

La fonction de validation croisée (Cross Validation),  $CV(\alpha)$  est utilisée afin de calculer le meilleur  $\alpha$  celui qui permet le meilleur équilibre entre lissage et prise en compte des points.

$$CV(\alpha) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( Y_i - \hat{g}^{(-i)}(t_i) \right)^2 \quad (f V-27)$$

Le meilleur  $\alpha$ , est donné par le CV minimal, auquel cas la spline calculée  $\hat{g}$  est le meilleur estimateur pour les observations  $Y_i$ .

## V-6-7 Calcul de l'enveloppe (Q2), prise en compte de la pondération.

Les splines de ce chapitre sont présentées avec une enveloppe qui ne correspond pas à l'enveloppe d'erreur, car le calcul final des formules à appliquer est encore en cours.

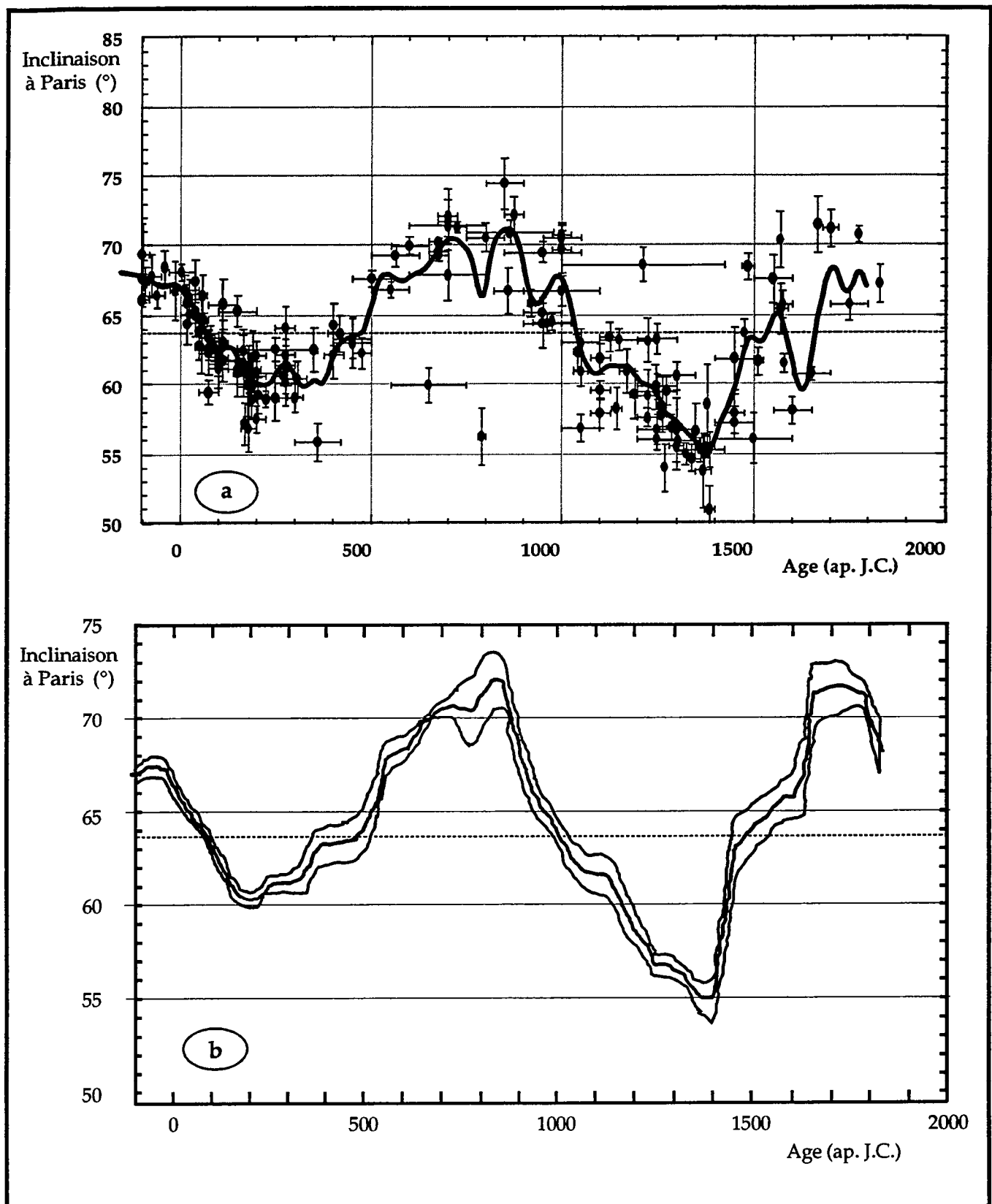


fig. V-10 : a, interprétation par traitement Spline Cubique (SC) des données d'inclinaison, en France, extraites des travaux de Bucur 1994, b, analyse Bucur 1994.



## V-7 Variation de l'inclinaison et de la déclinaison

Nous présentons d'abord les résultats de cette technique appliquée aux données directionnelles.

Nous avons choisi de traiter nos diagrammes avec un calcul de points  $t_i$  par fenêtres non chevauchantes de 10 ans. La faible largeur de la fenêtre est ainsi définie afin de tenir compte au mieux de chaque point expérimental. C'est à partir de ceux-ci que va être constituée la base de données des points  $t_i$ , utilisés pour le calcul de la SC. Il est donc important que cette base de données puisse rendre compte, avec le plus de précision possible, de la variation des composantes du champ. Le degré de lissage est déterminé par la suite, en fonction de la disposition des points  $t_i$ . Ce n'est donc pas à la sélection de la largeur de la fenêtre de jouer ce rôle.

Pour construire la courbe de référence nous utilisons le traitement par spline cubique appliqué sur les données publiées par Bucur (1994), par Kovacheva (1992), ainsi que la base de données du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes (UMR 153).

### V-7-1 Courbe de variation pour la France : travaux de I. Bucur

En 1994 I Bucur a publié ses résultats d'étude archéomagnétique pour des lots provenant essentiellement de la France. Le calcul de la courbe a été effectué par application de la méthode statistique bivariate (Le Goff, 1990), avec une fenêtre glissante de 80 ans. Les courbes univariées de variation de l'inclinaison et déclinaison sont déduites de la projection de Gauss, avec leur enveloppe  $\alpha_{95}$ .

Le résultat du traitement SC (fig. V-10a) est intéressant car il aboutit à une représentation relativement différente de celle de Bucur (fig. V-10b) mais de tendance générale identique.

On remarquera d'abord que la courbe est peu lissée (coefficient de lissage de  $4.0 \cdot 10^{-7}$ ). La fenêtre utilisée pour le calcul des points est de 10 ans. Il résulte de la faible valeur de  $\alpha$  et de la faible largeur de la fenêtre, un calcul de courbe sensible à la disposition des points ou aux éventuelles variations rapides de l'inclinaison.

La courbe Bucur se présente avec une allure plus adoucie que la notre. L'explication est peut-être à chercher dans la largeur de la fenêtre utilisée. Nous avons quelques remarques à émettre sur le traitement des séries chronologiques à l'aide d'une fenêtre mobile (Grais, 1974) :

- le pas de largeur de fenêtre est 80 ans. Si la série contient une variation régulière de période égale à la fenêtre d'analyse, elle va être filtrée par le traitement,

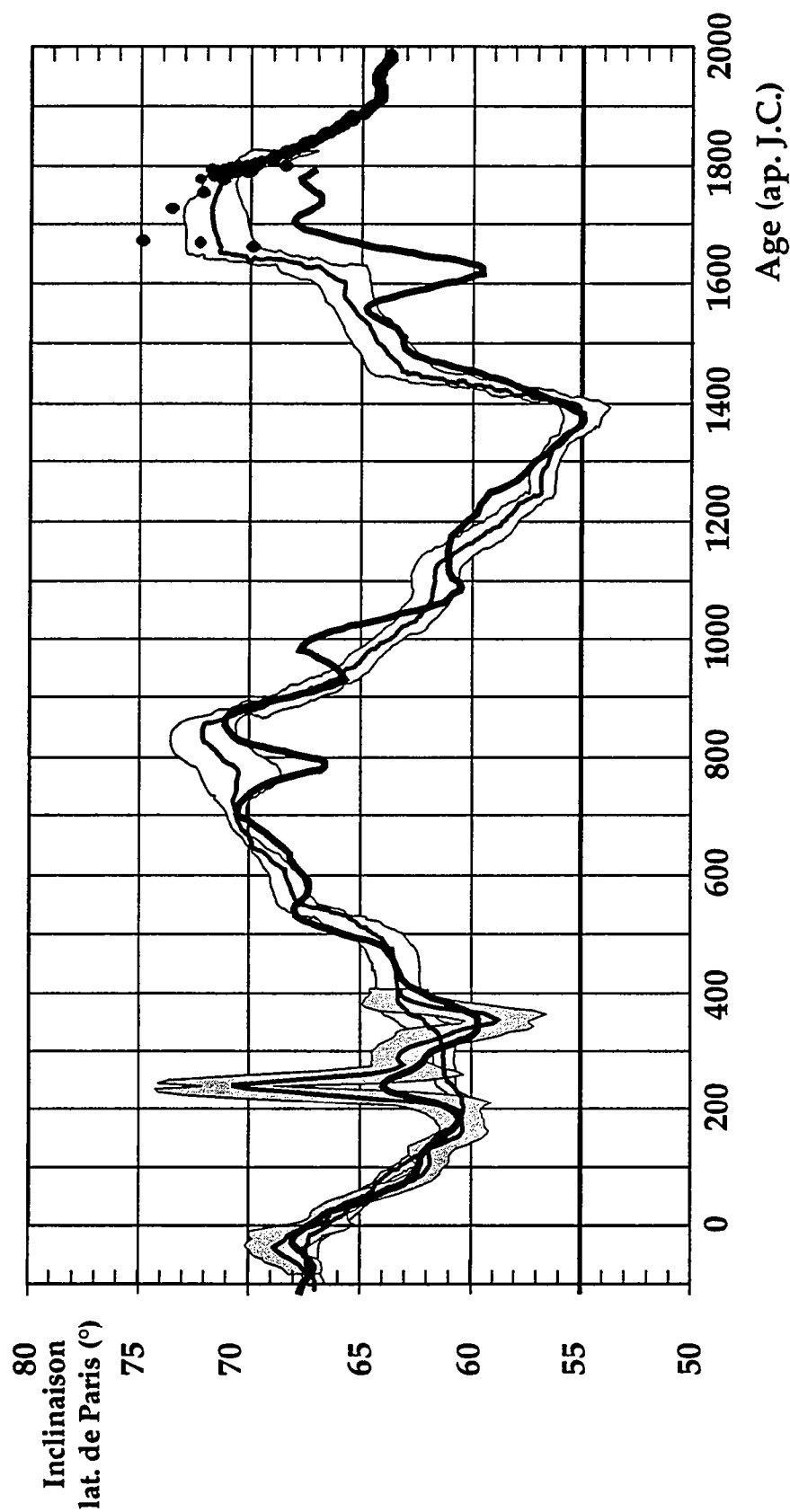


fig. V-11 : regroupement des différentes courbes de variation de l'inclinaison.

- en grisé : courbe de variation de l'inclinaison durant la période gallo-romaine, proposée par le Laboratoire d'Archéométrie (UMR 153), Lanos 1990,
- sur fond blanc : courbe de variation selon Bucur 1994,
- en trait gras, traitement en spline cubique de l'ensemble des données des deux références précédentes,
- points noirs : mesures directes.

- si la série chronologique présente des points de retournement de tendance, la série dérivée par moyenne mobile présentera elle aussi des points de retournement mais si la courbe est dissymétrique ceux-ci pourront être décalés en avance ou en retard, selon le cas,

- ce pas d'analyse a pour effet de gommer toutes les petites variations, qu'elles proviennent d'erreur méthodologique ou qu'elles soient réelles.

Les disparités les plus évidentes se situent aux périodes suivantes : vers 800, 1000, 1200-1300 et 1600-1800 ap. J.C., périodes pour lesquelles on observe une dispersion des données particulièrement forte.

Il faut noter qu'à partir de 1700 la courbe Bucur est la plus proche des valeurs mesurées en observatoire.

Nous sommes donc en présence de deux courbes, celle de Bucur et la notre, dont les interprétations posent problèmes car le résultat est parfois différent, malgré des données de départ identiques.

On notera à ce propos, que le Laboratoire d'Archéométrie de Rennes propose depuis 1983 (Langouët et al., 1983, Lanos, 1990, Laubenheimer et Lanos, 1994, fig. V-11), une courbe de variation de l'inclinaison dans la période gallo-romaine différente de celle de Bucur. Cette courbe présente, entre la fin du deuxième siècle et la moitié du quatrième, un pic atteignant les 70° d'inclinaison. Cette variation rapide n'apparaît pas telle quelle dans le traitement bivariante, mais, malgré un jeu de données différentes, est ébauché par un petit pic, dans le traitement SC des données Bucur.

Si donc, on complète le jeu de données en incluant les données rennaises dans le traitement spline, nous n'observons sur la courbe obtenue (fig. V-11) qu'une seule nouvelle disparité avec la courbe Bucur, durant la période 200-300 ap. J.C.

L'établissement d'une courbe de référence n'est pas encore entièrement résolu et la nécessité de travailler sur un nombre encore plus important de données, ou de réviser les données préexistantes, est bien mis en évidence.

### **V-7-B Variation de l'inclinaison en Bulgarie.**

Les courbes SCN (calculées à partir de fenêtres soit de 50 ans soit de 100 ans, fig. V-12 a et b) de Kovacheva ressemblent énormément à notre interprétation SC des données de I. Bucur.

Qu'advient-il de cette similitude après traitement des données d'inclinaison avec l'algorithme que nous avons développé.

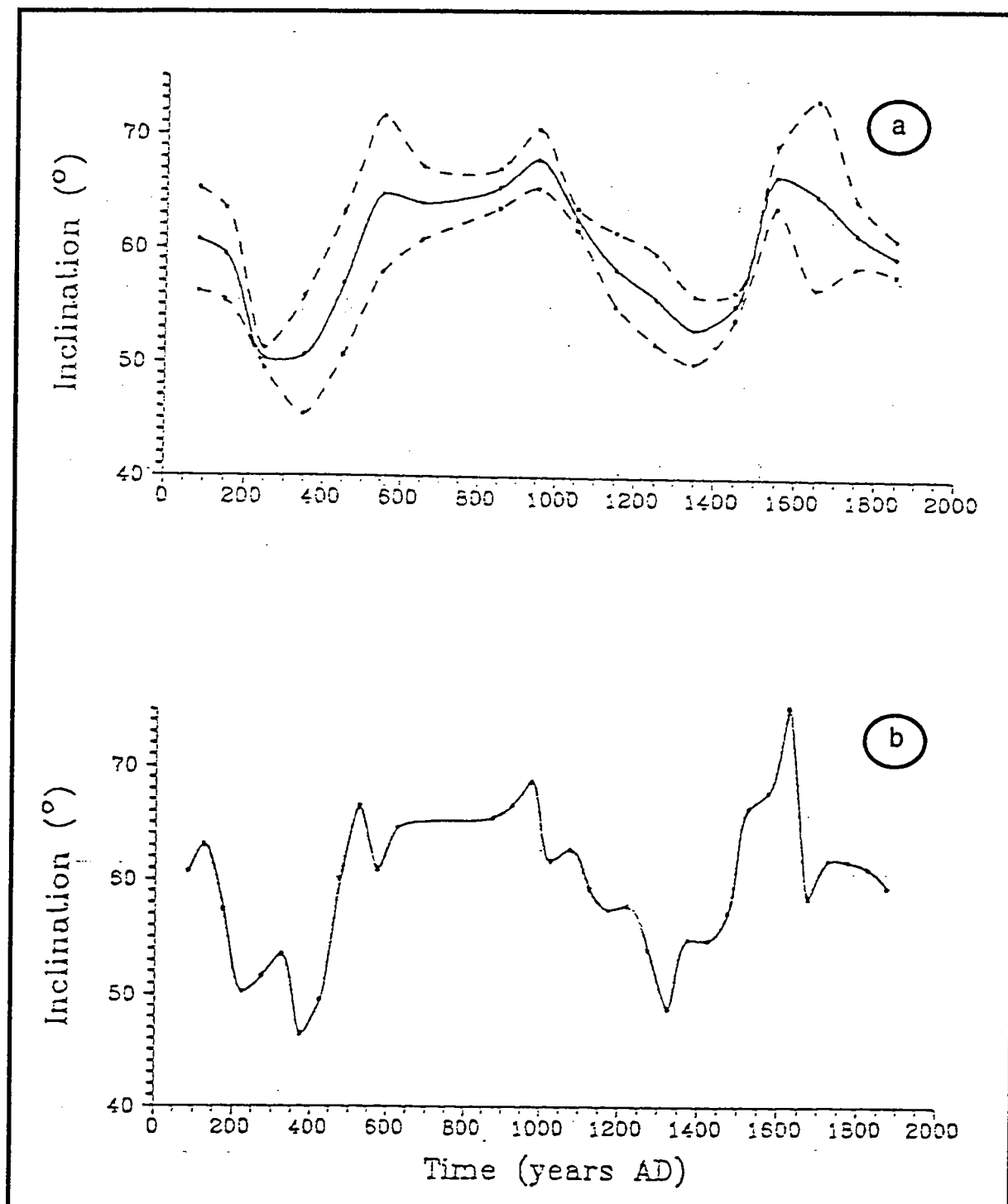


fig. V-12 : variations de l'inclinaison à Sofia, publiées par Kovacheva (1994), a, fenêtre de 100 ans, b, de 50 ans (traitement en spline cubique naturelle).

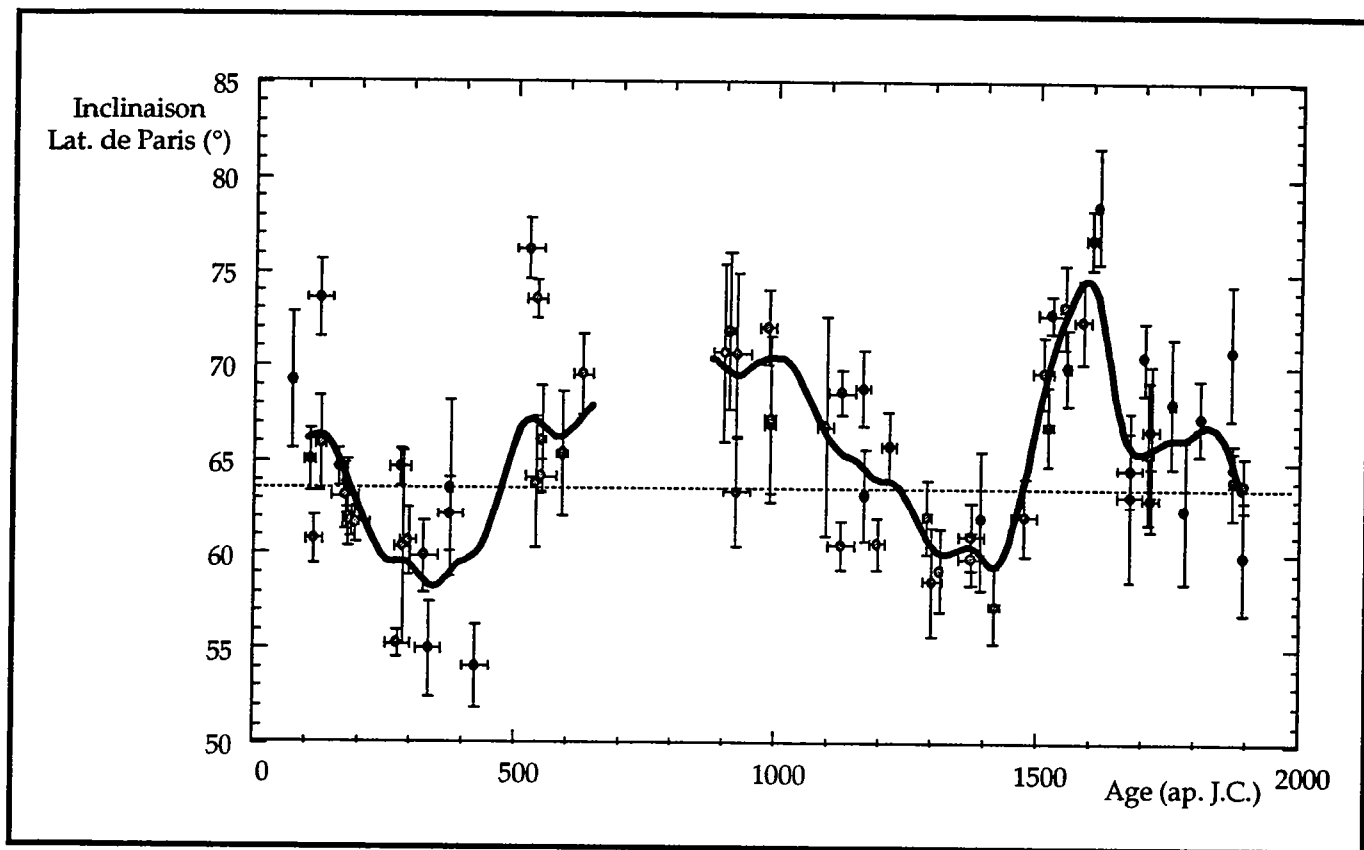


fig. V-13 : traitement en spline cubique des données d'inclinaison, obtenues pour la Bulgarie (Kovacheva 1992), triées et recalculées pour la latitude de Paris

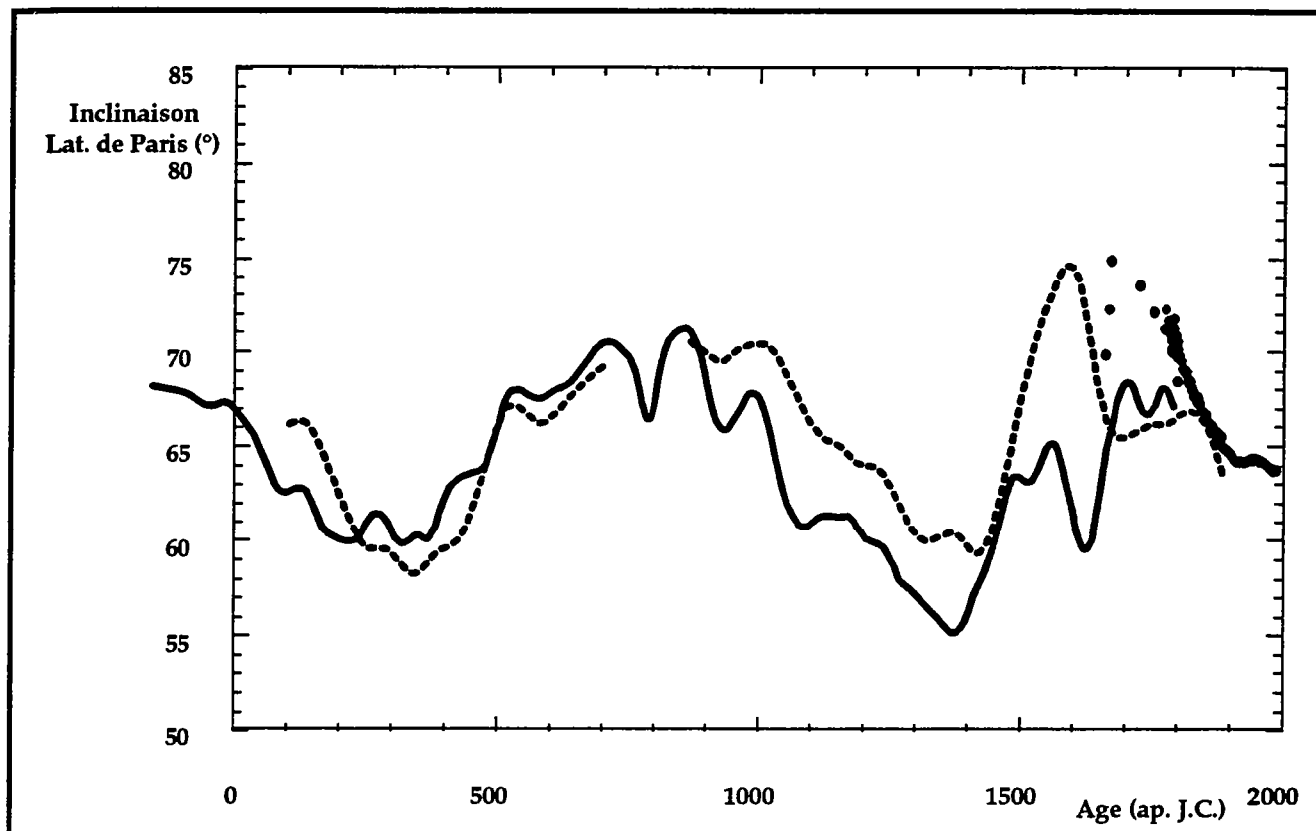


fig. V-14 : comparaison des deux courbes splines cubiques de variation d'inclinaison, calculées pour l'Europe, à la latitude de Paris.

- en trait continu : spline calculée pour la France,
- en pointillés : spline calculée à partir des données bulgares,
- points noirs : mesures directes en France.

Les données ont été sélectionnées selon les critères suivants : une erreur sur l'âge de plus ou moins 30 ans maximum, et une erreur inférieure à 10% de la valeur d'inclinaison estimée. Environ 80 données ont été ainsi conservées.

Un nouvel  $\alpha$  a été calculé lequel est faible ( $4.10^{-6}$ ).

Les valeurs d'inclinaison sont recalculées à la latitude de Paris (fig. V-13), par correction selon la formule du dipôle axial centré.

La période gallo-romaine se présente sous la forme d'une courbe concave décroissante de 120 ap. J.C. à 350 environ, de  $66^\circ$  à  $58^\circ$ . L'inclinaison augmente par la suite jusqu'à atteindre un premier maximum à  $67^\circ$  en 530 ap. J.C. Un léger minimum suit avec  $66.5^\circ$  environ en 590 ap. J.C.

La spline n'est pas représentée sur une période de 600 à 900 ap. J.C., faute de données.

Un minimum est noté en 920 avec  $69^\circ$  environ, suivi d'un maximum en 1000 ap. J.C., à  $75^\circ$  environ. La suite est une décroissance relativement régulière de l'inclinaison, jusqu'en 1330 ap. J.C., avec  $60^\circ$ .

L'inclinaison augmente alors rapidement pour atteindre son maximum en 1600 avec  $80^\circ$  environ.

Bien que moins lissée que la représentation SCN, cette interprétation reste fondamentalement proche de la version de Kovacheva (fig. V-12).

Elle peut toutefois être critiquée. Le choix de passage de la courbe dans certaines zones de points en cravate est discutable à cause de la grande dispersion parfois observée, dispersion que le faible nombre de points ne peut corriger (ce qui est surtout le cas de la période gallo-romaine).

### V-7-C Comparaison des deux courbes d'inclinaison (à la latitude de Paris)

De fortes analogies sont observées entre les différentes interprétations SC, naturelles ou non (fig. V-14) : une diminution d'inclinaison entre 200 et 300, des valeurs plus fortes entre 500 et 1100, et de nouveau une baisse forte de l'inclinaison entre 1100 et 1400 ap. J.C.

La plus grande différence réside dans l'interprétation de la période 1500-1700, période pour laquelle nous avons déjà fait remarquer l'allure singulière de la courbe spline cubique que nous avons calculé à partir des données Bucur.

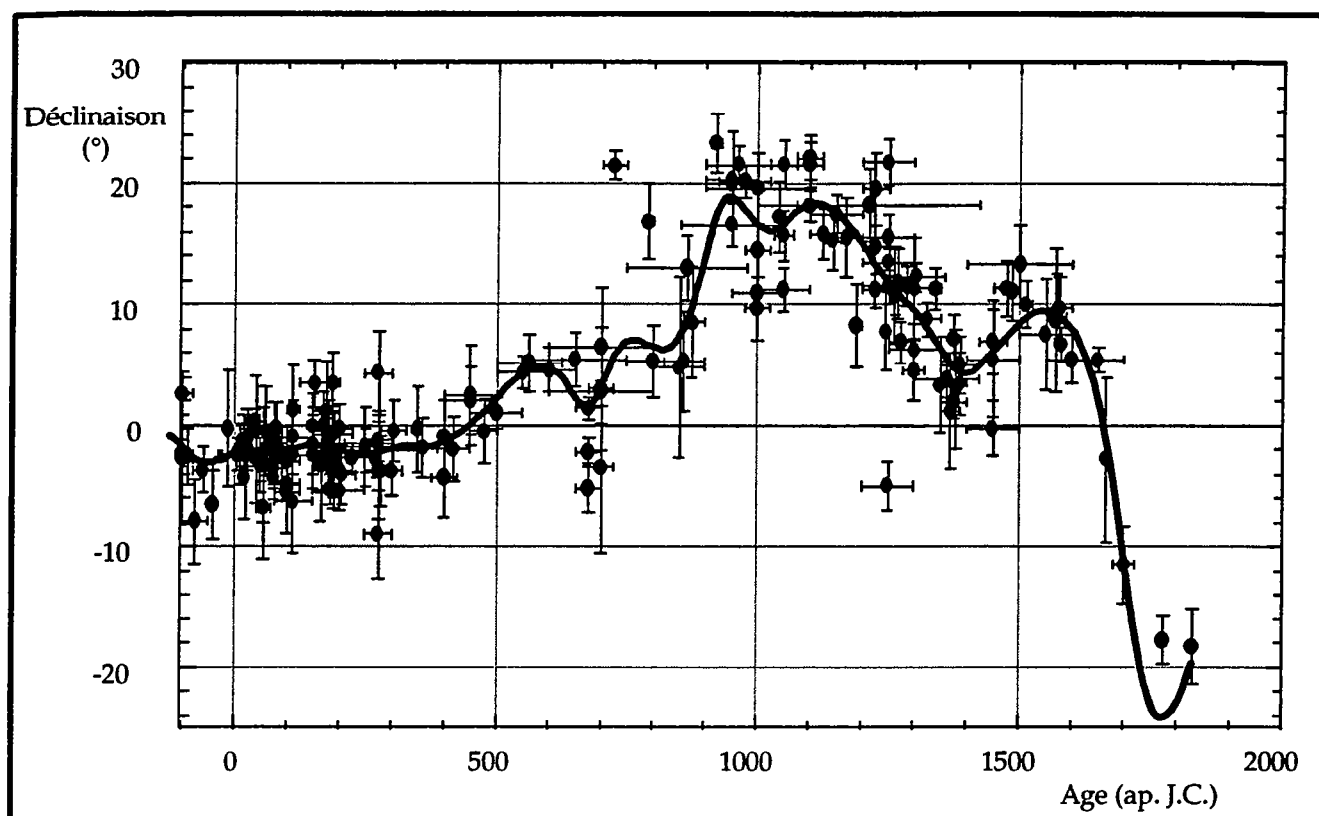


fig. V-15 : traitement en spline cubique des données de déclinaison, en France, extraites des travaux de Bucur 1994.

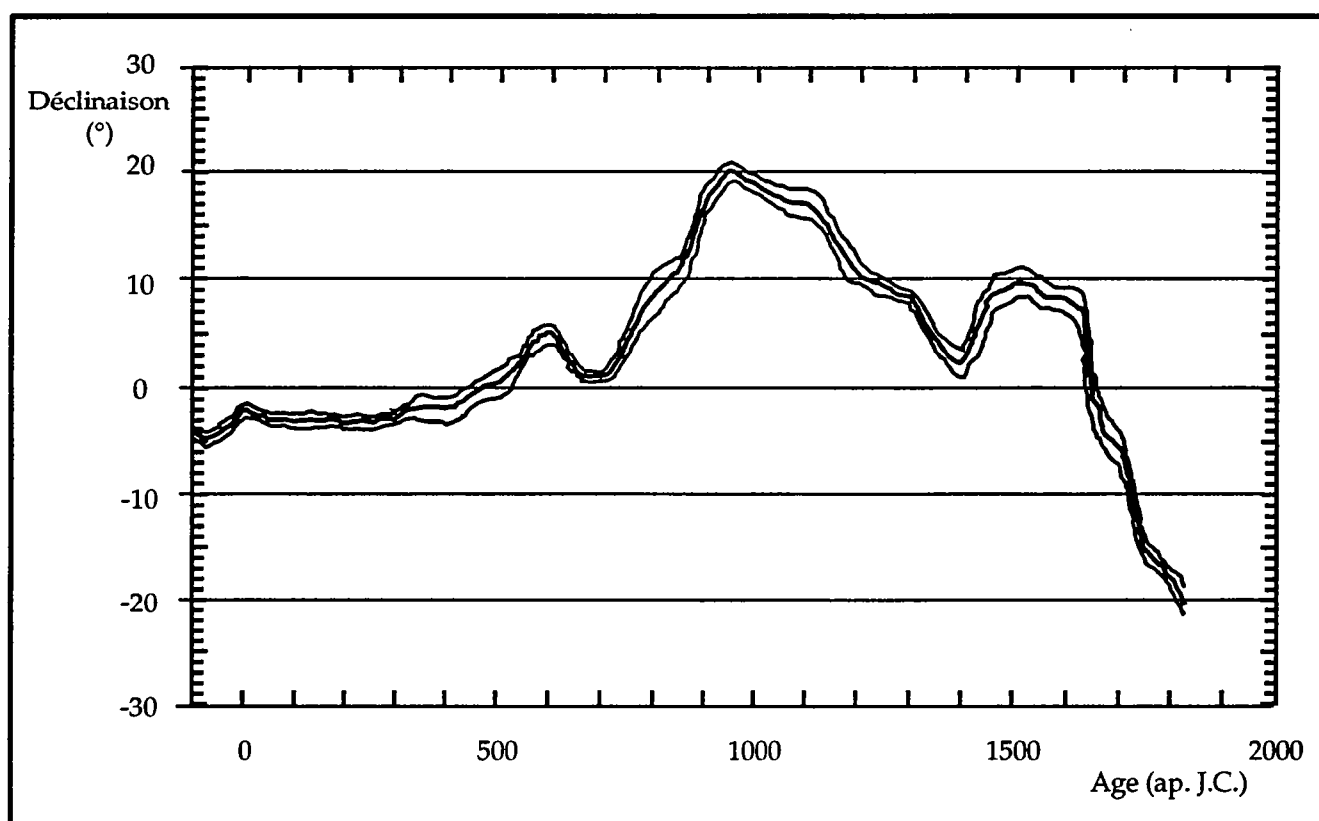


fig. V-16 : variation de la déclinaison pour Paris selon Bucur 1994.



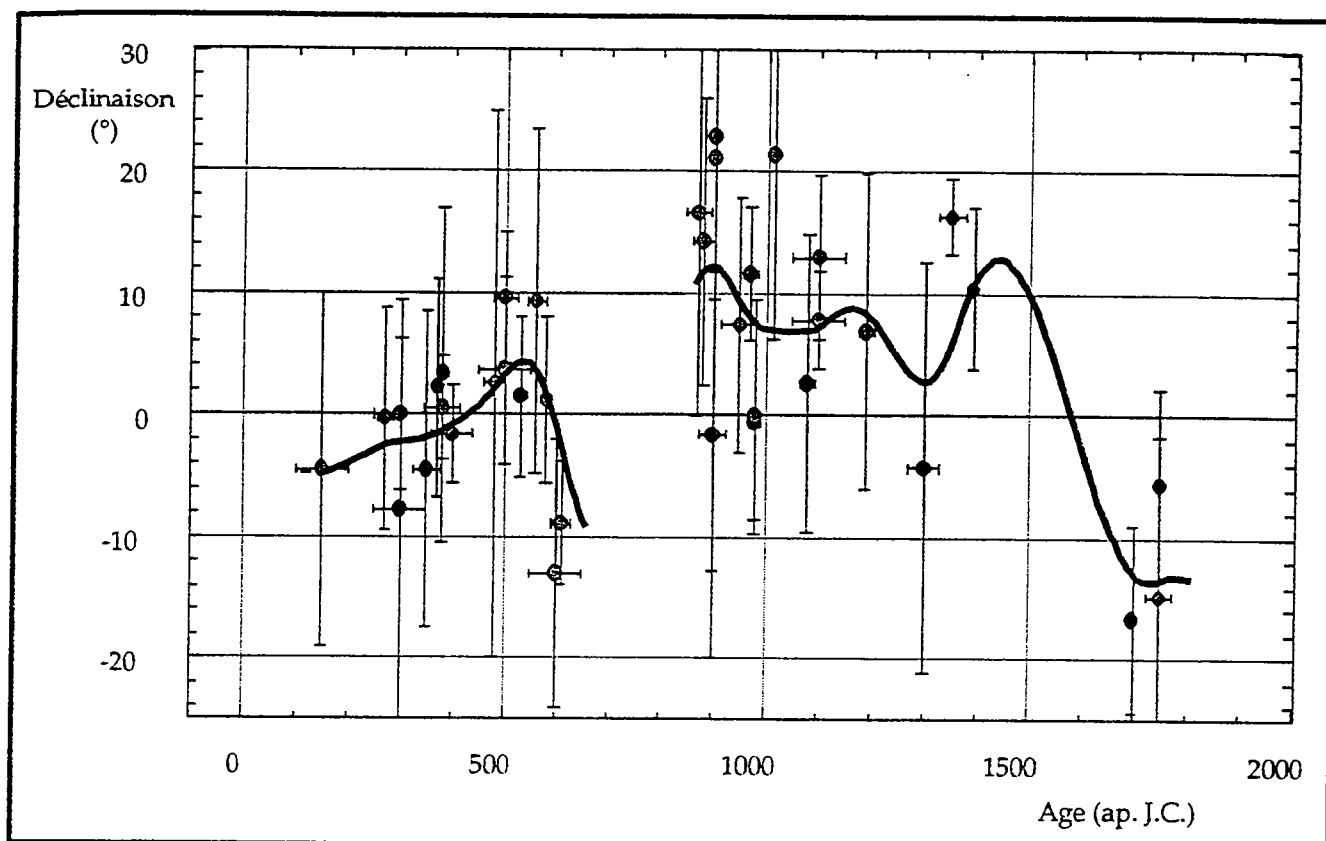


fig. V-17 : traitement en spline cubique des données de déclinaison, en Bulgarie, extraites des travaux de Kovacheva 1992.

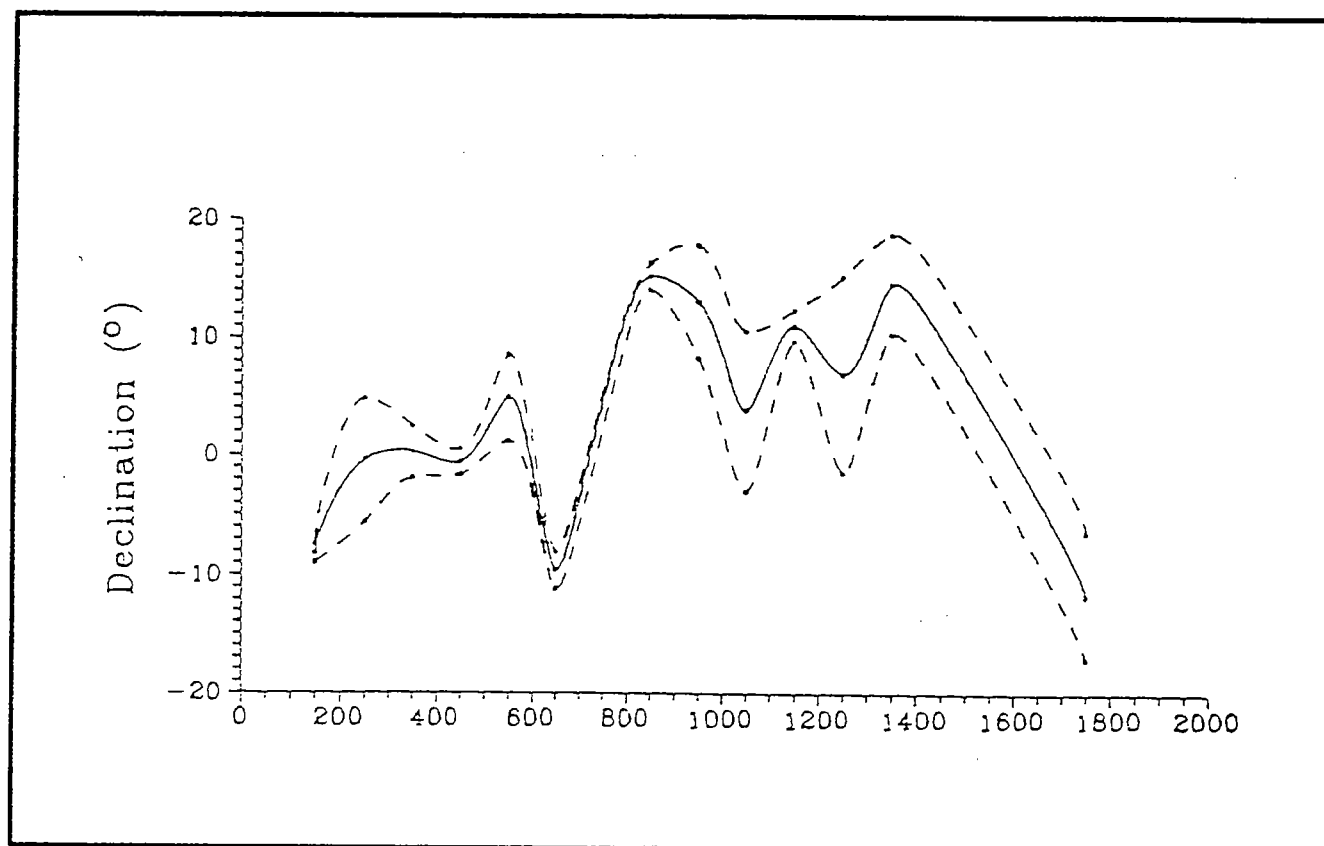


fig. V-18 : variation de la déclinaison à Sofia (Kovacheva 1994)

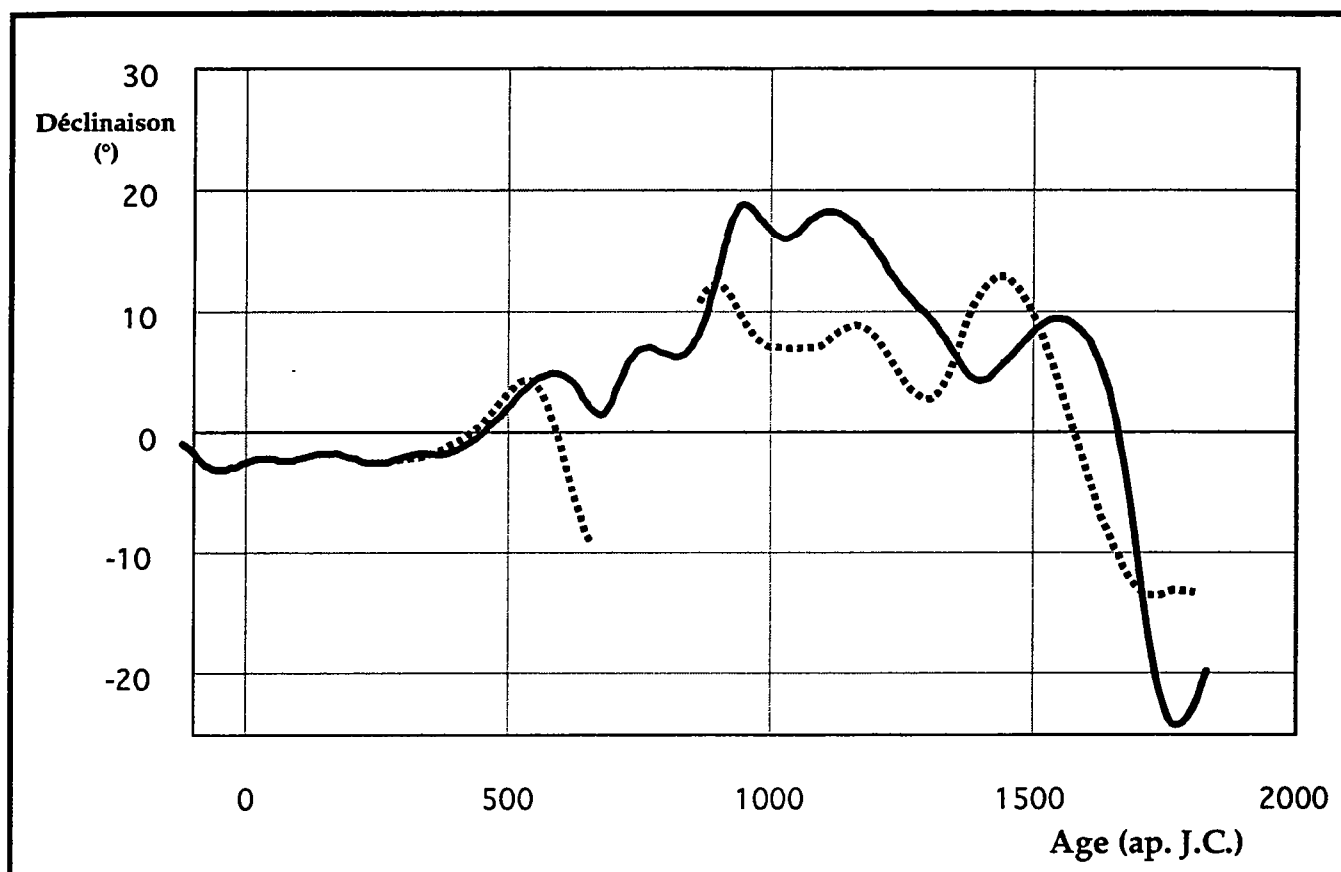


fig. V-19 : comparaison des deux courbes splines cubiques de variation de déclinaison, calculées pour la France (trait continu) et pour la Bulgarie (en pointillés).

## **V-8 Variation de la déclinaison**

### **V-8-1 Données de I. Bucur, France**

Le traitement en SC des données de Bucur 1994 (fig. V-15) permet une description identique à celle de l'auteur (fig. V-16), de la variation de la déclinaison. Cet accord, bien meilleur que celui observé entre les courbes d'inclinaisons, est probablement lié à la moindre dispersion des données.

### **V-8-2 Données bulgares**

Les données présentées par M Kovacheva sont très clairsemées, avec de grandes marges d'erreurs sur les estimations. De part la faiblesse de l'échantillonnage, nous avons conservé l'intégralité des données. L'interprétation de la courbe est donc fragile et relative (fig. V-17).

Notre interprétation est quasi-similaire à celle publiée par Kovacheva (fig V-18). Sa courbe est calculée par une SCN de fenêtre 100 ans. On note toutefois que des lacunes existent entre 700 et 900 ap. J.C. ainsi qu'entre 1400 et 1700 ap. J.C., laissant une grande part d'interpolation au calcul de la spline, d'autant plus que seuls une quarantaine de points sont connus.

### **V-8-3 Comparaison des courbes de déclinaison**

Bien que d'amplitude différente, nous retrouvons un certain synchronisme des pics de déclinaison entre Europe de l'Ouest et Europe de l'Est (fig. V-19).

Des précautions sont à prendre avec les données de déclinaison de M. Kovacheva, de par leur dispersion et marge d'erreur. Ainsi les interprétations entre 600 et 900 ap. J.C., et 1400 et 1700 ap. J.C., sont en fait des interpolations à cause du manque de données. Malgré les qualités de la spline, elles peuvent être des périodes sujettes à caution.

## **V-9 Utilisation des SC pour l'élaboration d'une courbe de variation séculaire de l'intensité**

Nous avons appliqué le traitement en fonction SC aux données d'intensité recueillies pour l'Europe de l'Ouest et de la Bulgarie et de la Grèce exposées précédemment.

Nous utilisons aussi les données d'intensités établies à Rennes.

Nous rappelons ici que le traitement en spline cubique est en cours d'élaboration : le calcul de l'enveloppe d'erreur est à revoir, et l'âge de certaines données a changé.

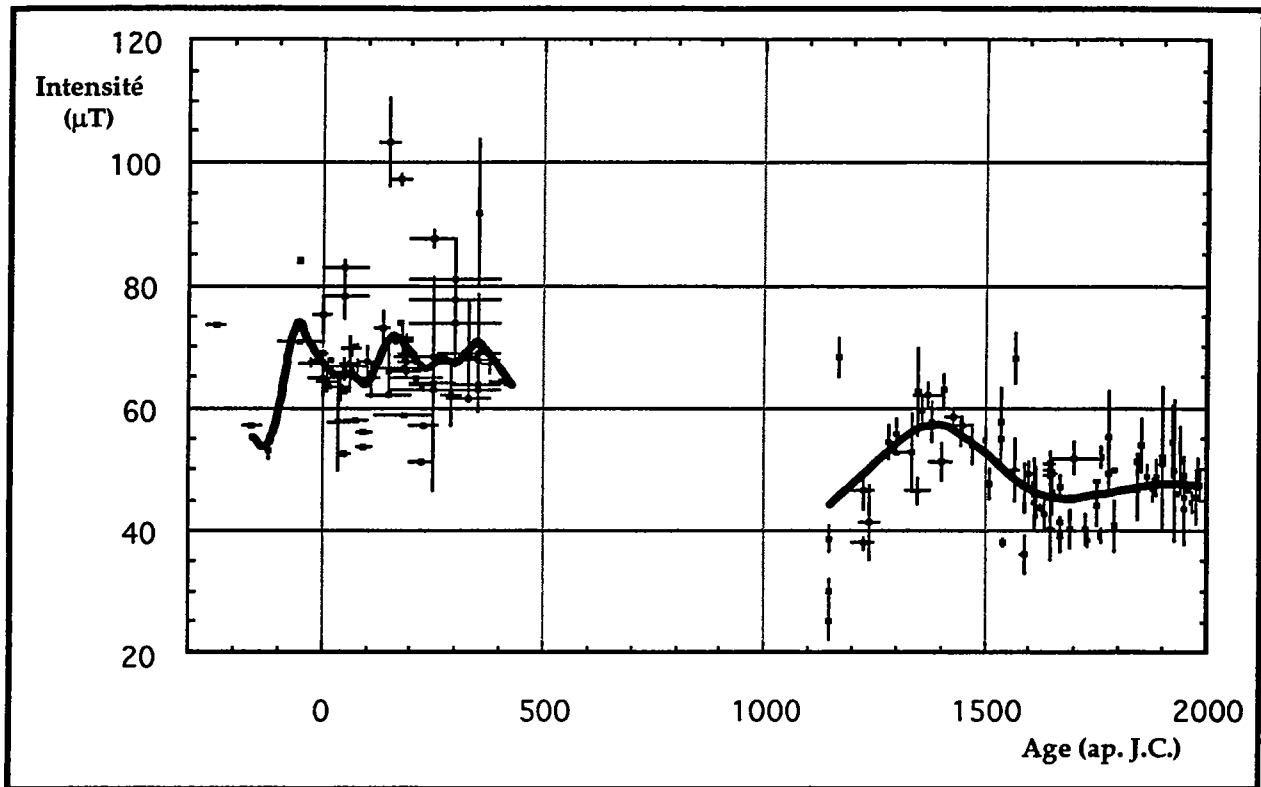


fig. V-20 : traitement en spline cubique des données d'intensité pour l'Europe de l'Ouest, données non triées et corrigées de la latitude.

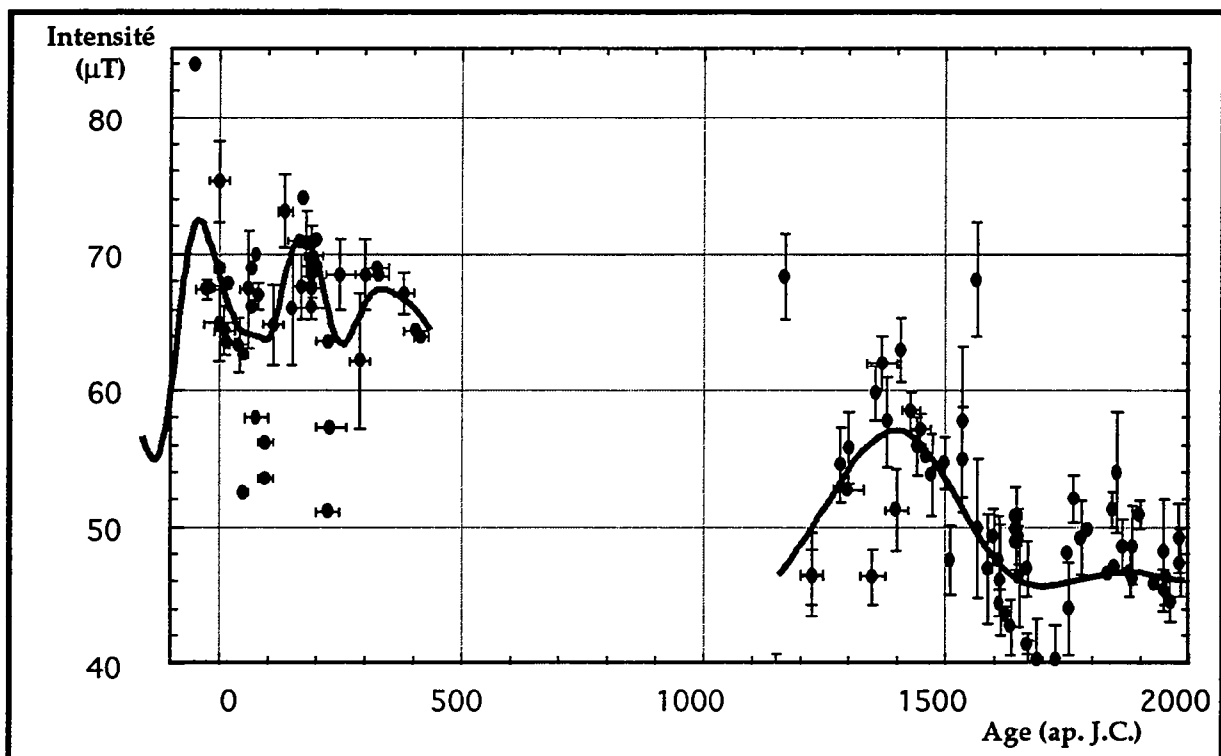


fig. V-21 : traitement en spline cubique des données d'intensité pour l'Europe de l'Ouest, données triées et corrigées de la latitude.

## V-9-1 Europe de l'Ouest

Le traitement est effectué en deux temps.

A) données corrigées de la latitude, séparées en fonction de la lacune du Moyen-Âge en "avant 500" et "après 1000 ap. J.C." (fig. V-20). La séparation de l'ordre de cinq siècles est trop importante pour que l'allure de la SC dans l'Antiquité ait une influence sur le calcul de la courbe après le début du onzième siècle.

B) sélection des données en fonction des incertitudes associées aux estimations. Ont été rejetées les mesures dont l'incertitude est supérieure à 10%, ainsi que celles dont l'erreur sur l'âge est supérieure à plus ou moins 30 ans (restaient 118 données sur 159). Le traitement séparé entre périodes Antique et Moderne est conservé (fig V-21).

Dans tous les cas le calcul a été effectué en tenant compte de la pondération attribuée à chaque valeur.

Le résultat est quasi identique dans les deux cas. Aussi nous ne décrirons que les résultats obtenus avec des données triées.

### Période Antique

L'allure de la courbe est douce, de forme grossièrement sinusoïdale, le facteur  $\alpha$  est faible et le lissage est peu marqué. Nous pourrions presque parler de période de l'ordre de 200 ans.

L'action du tri se fait sentir par un meilleur alignement des points  $t_i$  avec la spline, bien que deux zones "troubles" subsistent entre 50 et 100 ap. J.C., et entre 200 et 250 ap. J.C. L'allure de la courbe et la disposition des maxima et minima en sont peu affectées, ce qui est de bon augure quant au calcul de la spline. Pour le calcul de l'allure de la courbe de variation de l'intensité pendant la période gallo-romaine en Europe de l'Ouest, 47 données ont été utilisées.

Nous notons deux maxima de 70  $\mu T$  environ, situés en 160-180 ap. J.C. et 320-350 ap. J.C. Un troisième maximum pourrait exister avant notre ère, mais il n'est pas daté par manque de données. Un minimum serait présent vers 70-100 ap. J.C. à 64  $\mu T$  environ, ainsi que vers 230-250 ap. J.C. à 62-63  $\mu T$ . La valeur de la spline est décroissante après 400 ap. J.C.

La variation de l'intensité sur ces quatre siècles aurait donc été faible, avec une évolution maximale d'amplitude de 10  $\mu T$  environ.

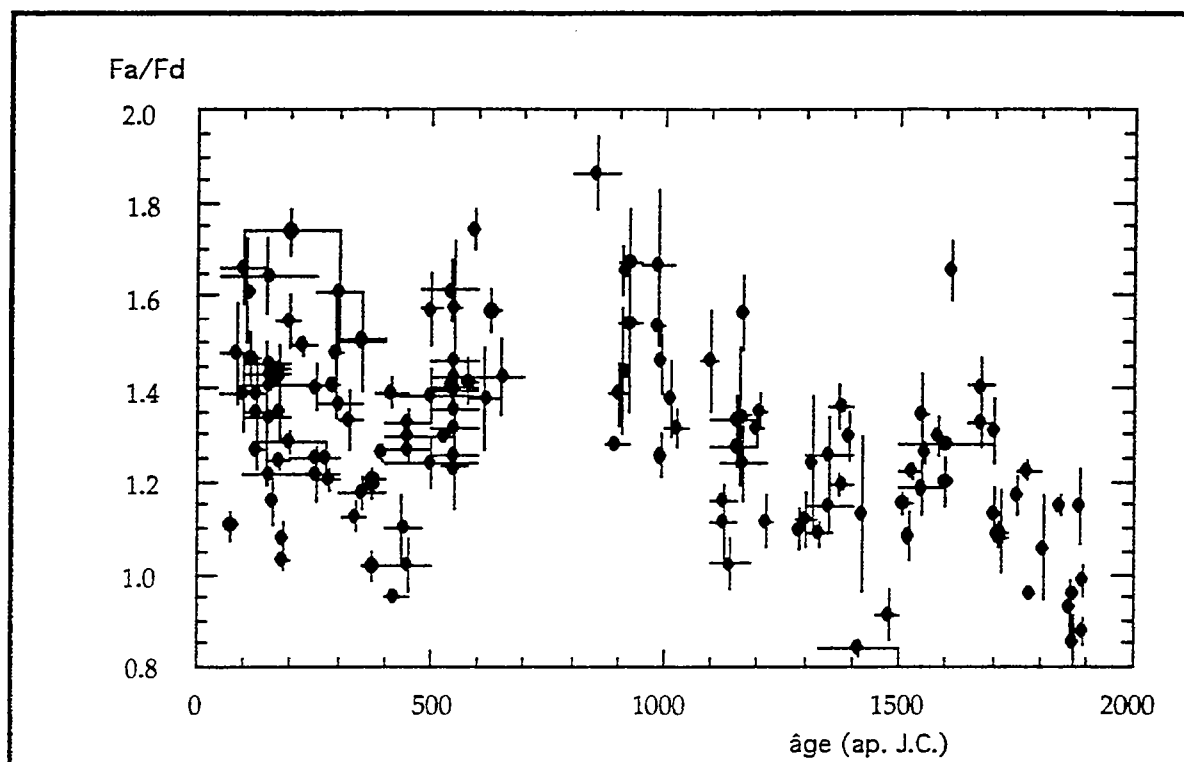


fig. V-22 : données d'intensité publiées par Kovacheva en 1992. La présentation est effectuée selon le rapport entre intensité ancienne,  $F_a$ , et intensité dipolaire  $F_d$ , à la latitude de Sofia.

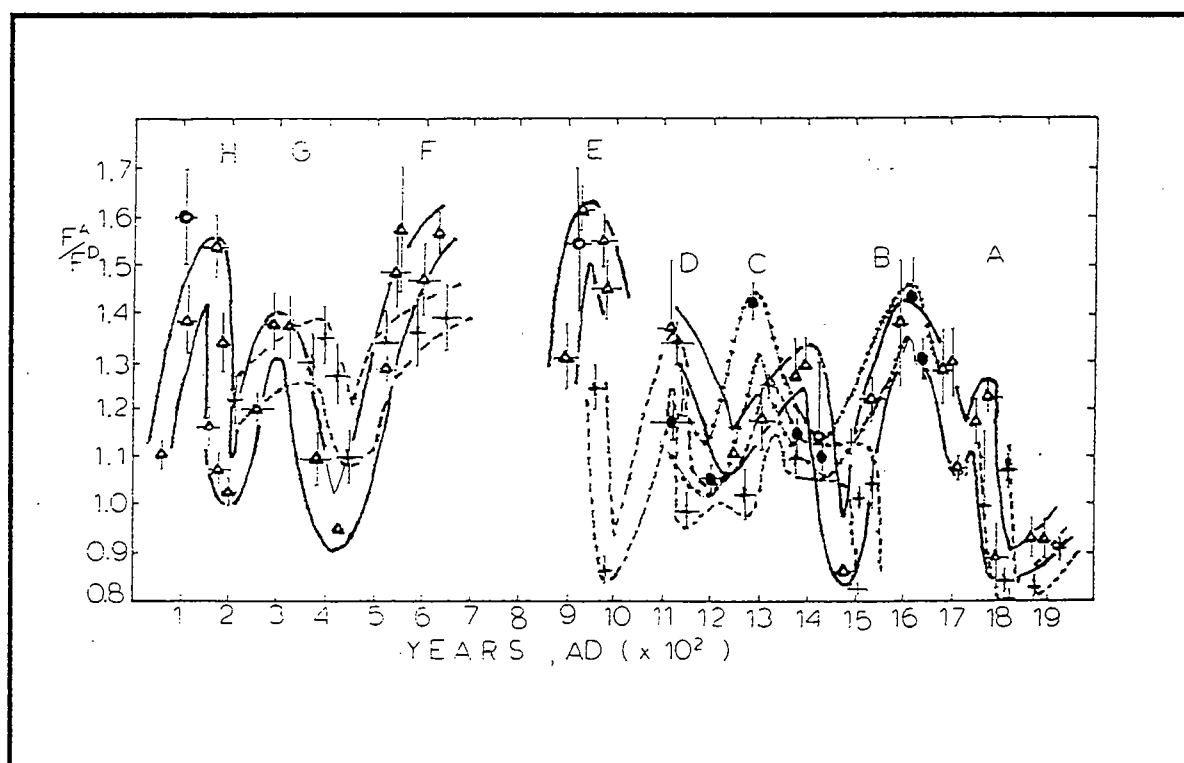


fig. V-23 : interprétation des données d'intensité, selon trois bandes de latitude, pour la Bulgarie (triangles blancs pointant vers le haut), la Grèce du Nord (croix) et Grèce du Sud (cercles noirs), Liritzis & Kovacheva (1992).

## Période Moderne : de 1100 ap. J.C. à l'actuel

71 données sont utilisables après le tri. Le calcul du coefficient alpha en est faiblement affecté et la valeur de ce dernier  $8 \cdot 10^{-4}$  est quasiment la même que dans le cas des données non triées. Il en est de même pour l'allure de la spline.

On remarque sur la période 1100-1400 une croissance des valeurs d'intensité. La spline, en fait, ne suit pas les valeurs de Games et Davey 1981 pour le début du douzième siècle, car elles sont contrebalancées par une valeur élevée de Rolph et Shaw, 1986.

Un maximum d'intensité à 57  $\mu\text{T}$  environ serait situé en 1400 ap. J.C. Celui-ci serait suivi d'un minimum à 46  $\mu\text{T}$  environ, en 1660-1670 ap. J.C. L'intensité aurait faiblement varié par la suite, et ce jusqu'à l'actuel. Nous discuterons de cette interprétation par la suite (nous en avons déjà parlé dans le chapitre traitant de la pondération), mais nous pouvons déjà remarquer, entre 1600 et 1800 ap. J.C., des valeurs basses d'estimation de l'intensité proches de 40  $\mu\text{T}$ .

L'allure de cette courbe amène quelques remarques:

- la courbe de variation établie à partir des mesures d'observatoire dès 1883 est en accord avec l'interprétation de la spline. Nous pouvons d'ailleurs limiter le calcul de la spline à cette date,

- le modèle Bloxham et Jackson (1992) ne propose pas la même construction que la courbe spline. Entre 1700 et 1800 ap. J.C., l'intensité aurait été plus élevée, proche de 50  $\mu\text{T}$ , ceci en accord avec notre estimation pour  $1715 \pm 15$  à  $52,1 \pm 2,7$   $\mu\text{T}$ . Nous noterons d'ailleurs que la forte pondération attribuée à cette estimation "relève" le tracé de la spline, et de fait celle-ci s'éloigne des données d'estimation d'intensité plus faible, plus nombreuses mais de pondération moins élevée.

## V-9-2 Etude de la variation séculaire de l'intensité en Bulgarie.

Par rapport à ces derniers travaux publiés, il est possible de citer deux articles de M. Kovacheva en 1992 et un en 1994.

Le premier article de 1992 consiste en la publication des données accumulées et réactualisées pour être présentées sous la classique forme inclinaison, déclinaison et intensité sous la forme de rapport  $F_a/F_d$  (voir formule f V-9). Les courbes de variations ne sont pas des courbes à proprement parler car elles ne sont pas interprétées et seuls sont placés les points (fig. V-22).

Suite à cet article, un nouveau est publié aussi en 1992, mais en collaboration avec Liritzis. Cette publication présente cette fois une interprétation des données des résultats d'intensité obtenus pour la Crète, la Grèce et la Bulgarie, soit trois bandes de latitudes superposées du Sud au Nord. Trois courbes sont calculées, on ignore comment, pour chacune de ces bandes, et sont présentées sous

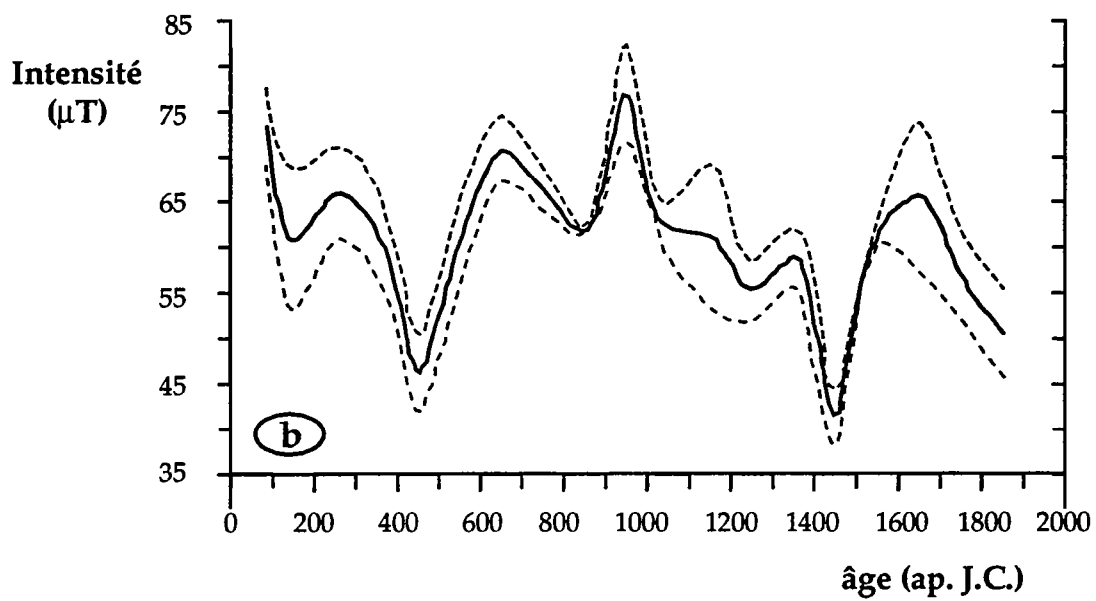
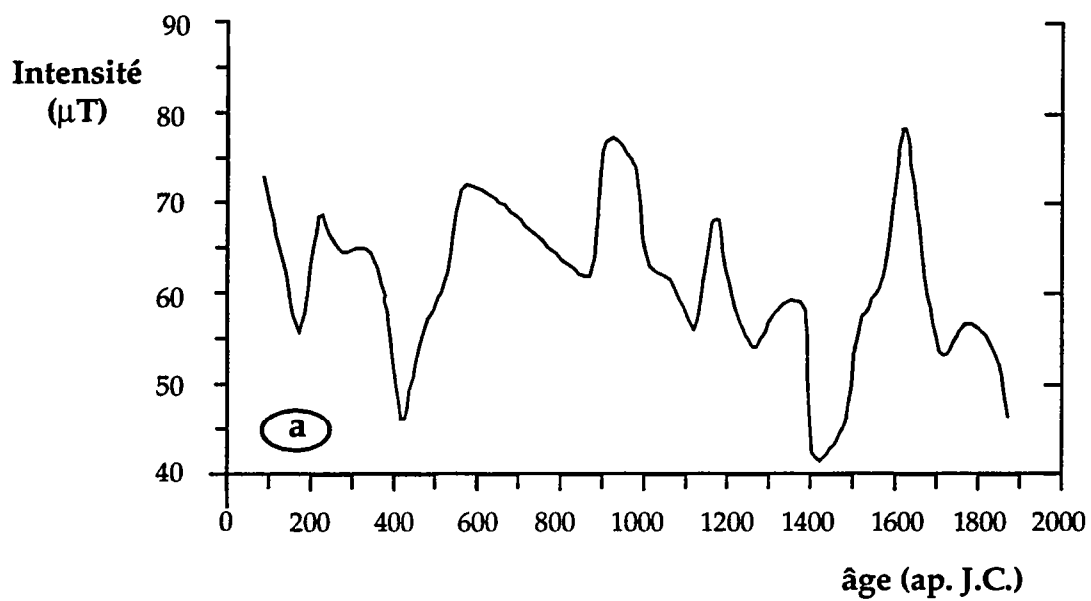


fig. V-24 : traitement en spline cubique naturelle (SCN) des données d'intensité, avec fenêtre de 50 ans (a), et 100 ans (b), d'après Kovacheva (1994).



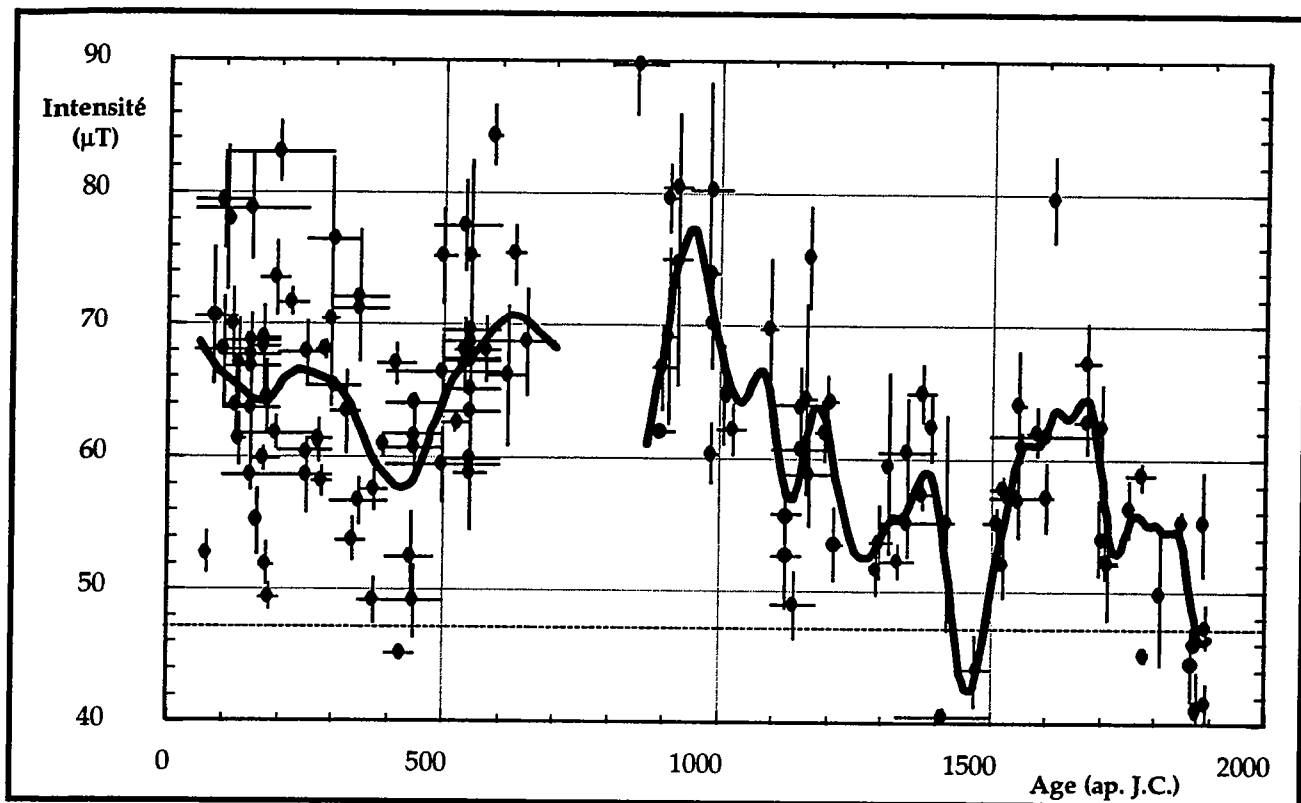


fig. V-25 : traitement en SC des données (non triées) de Kovacheva (1992). Les données ont été traitées séparément en période de 0 à 700 ap. J.C. et en période de 80 à 1900 (latitude de Sofia).

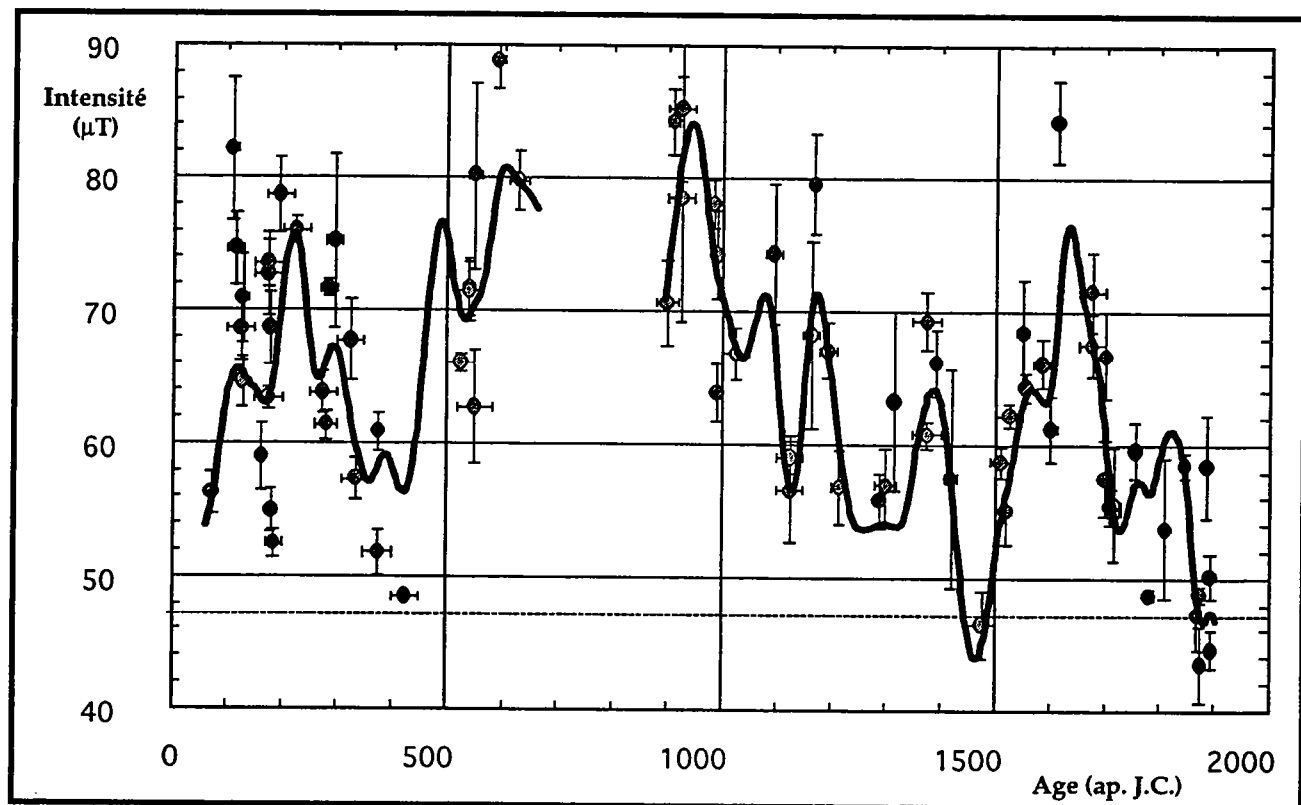


fig. V-26 : traitement en SC de données de Kovacheva en 1992. Données triées en fonction d'une barre d'erreur sur l'incertitude inférieure à 10% de l'intensité moyenne, et une incertitude sur l'âge ne dépassant pas plus ou moins 30 ans (latitude de Paris).

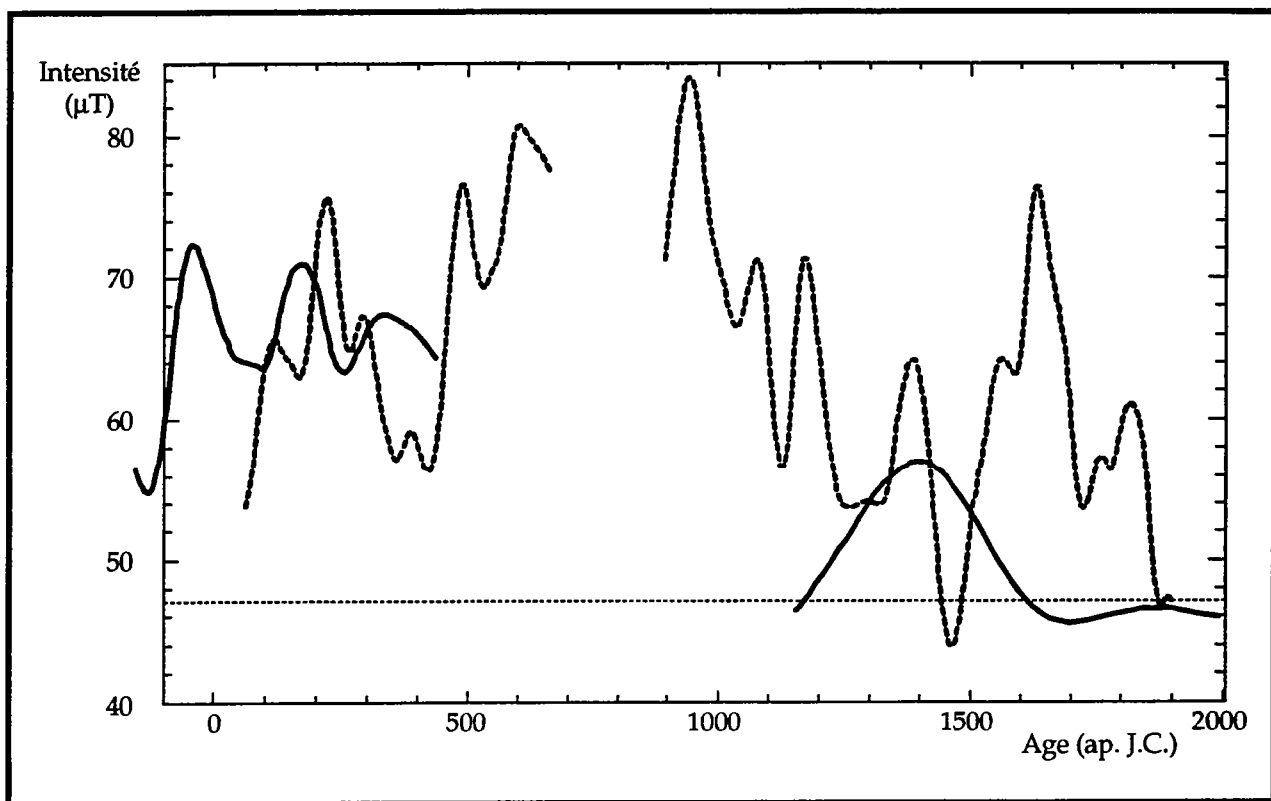


fig. V-27 : comparaison des deux courbes splines cubiques de variation d'intensité, calculées à la latitude de Paris, à partir des données européennes (trait continu), et bulgares (en pointillés).

la forme  $F_a/F_d$ . La conclusion de cet article est que la variation de l'intensité peut être rapide (et même très rapide vu le diagramme, fig. V-23).

En 1994 M. Kovacheva et A. Toshkov analysent leurs résultats de déclinaison, inclinaison et intensité. Les courbes de variation de ces valeurs sont calculées en appliquant une fonction SC, mais naturelle, sur des points calculés avec des fenêtres non chevauchantes de 50 ou 100 ans. On notera la largeur importante des fenêtres qui provoque un lissage important des données (fig. V-24 a et b).

Quelques différences sont notées entre l'interprétation de 1992 et celle de 1994 (fig. V-23 et V-24 a et b).

La plus grande différence concerne le milieu du premier siècle dont l'intensité est trouvée de valeur faible dans la version de 1992 et de valeur élevée dans la version de 1994.

Par contre sont observés en commun un maximum vers 250-300 ap. J.C., un minimum vers 400-450 ap. J.C., un maximum est soupçonné vers le début de 700 ap. J.C. (ref. 1992 et 1994), un minimum vers 850 ap. J.C. (ref 1994), un maximum vers 1000 ap. J.C. (1992) ou 950 ap. J.C. (1994), un minimum vers 1250 ap. J.C. (1992 et 1994), un maximum vers 1400 ap. J.C. (ref 1992 et 1994), un minimum vers 1450-1500 ap. J.C. (1992 et 1994), un pic vers 1650 (1992 et 1994) et un minimum vers 1850.

On remarque que l'interprétation de Kovacheva est bien supérieure au modèle de Bloxham et Jackson, 1992, calculé pour la latitude de Sofia, entre 1700 et 1900 (fig. V-2).

#### **Traitement en SC de données de Kovacheva en 1992**

Le calcul de SC s'est effectué en deux temps : les données ont d'abord été traitées séparément en période de 0 à 700 ap. J.C. et en période de 800 à 1900 car il existe une lacune entre 650 et 850 ap. J.C. (fig. V-25).

Nous avons ensuite appliqué notre programme de SC à l'ensemble des données sélectionnées. Le tri réduit le nombre des données de 140 à 85 soit les 2/3 de la base de travail du départ. Les critères de sélection utilisés sont les mêmes que ceux précédemment décrits à savoir une incertitude sur l'estimation ne dépassant pas 10% et une erreur relative en âge inférieure ou égale à 30 ans.

L'ensemble a été traité d'un bloc de 0 à 1900 ap. J.C. L'interprétation en SC est quasiment la même (fig. V-26). Seule varie la valeur du  $\alpha$  qui dans le second cas est très faible,  $2.5 \cdot 10^{-7}$ , au lieu de  $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-5}$  de 0 à 650, et  $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-6}$  de 850 à 1900 pour les deux portions calculées à partir des données non triées.

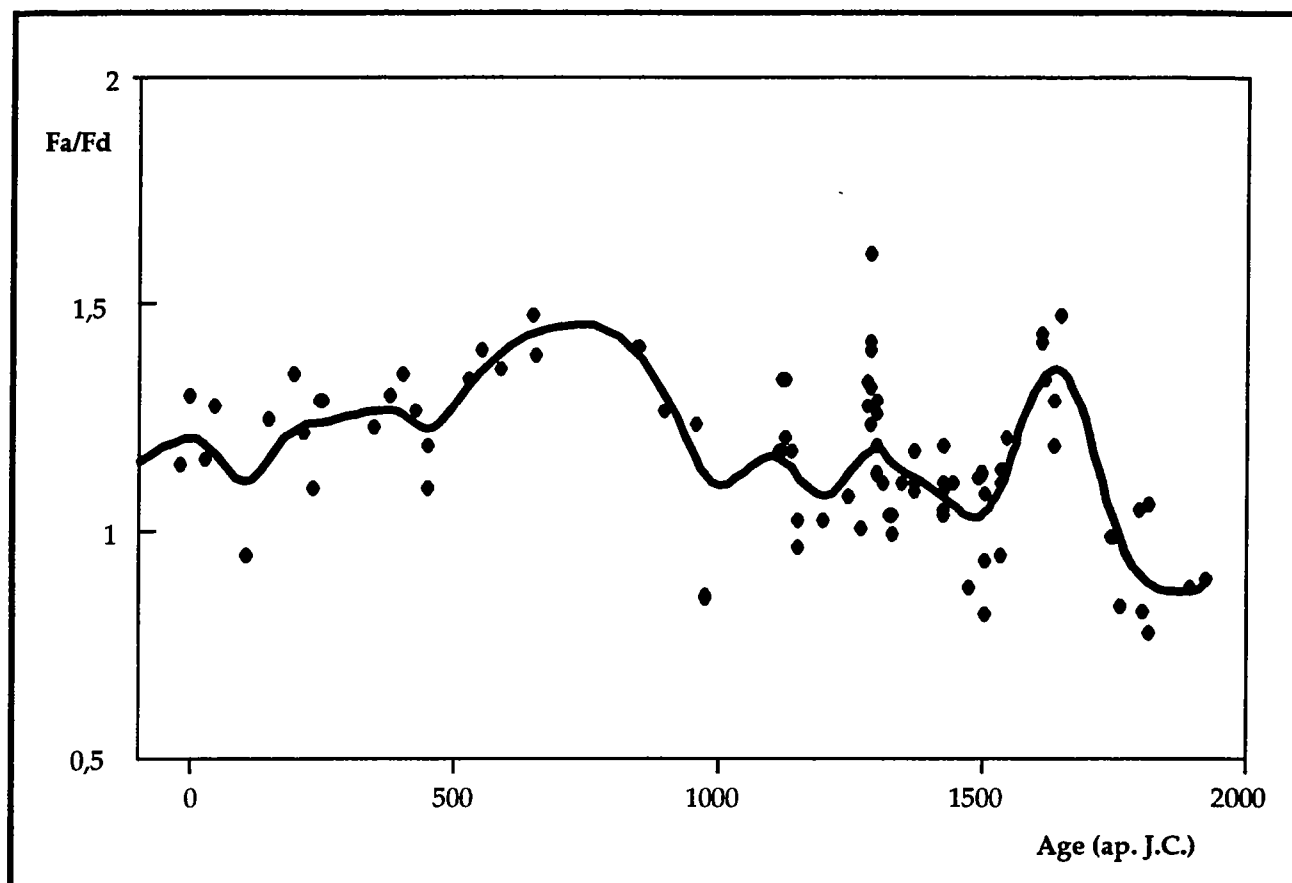


fig. V-28 : interprétation par traitement SC des données d'intensité regroupées par Xanthakis et Liritzis (1991). La représentation est effectuée selon le rapport entre intensité ancienne,  $Fa$ , et intensité dipolaire,  $Fd$ ,

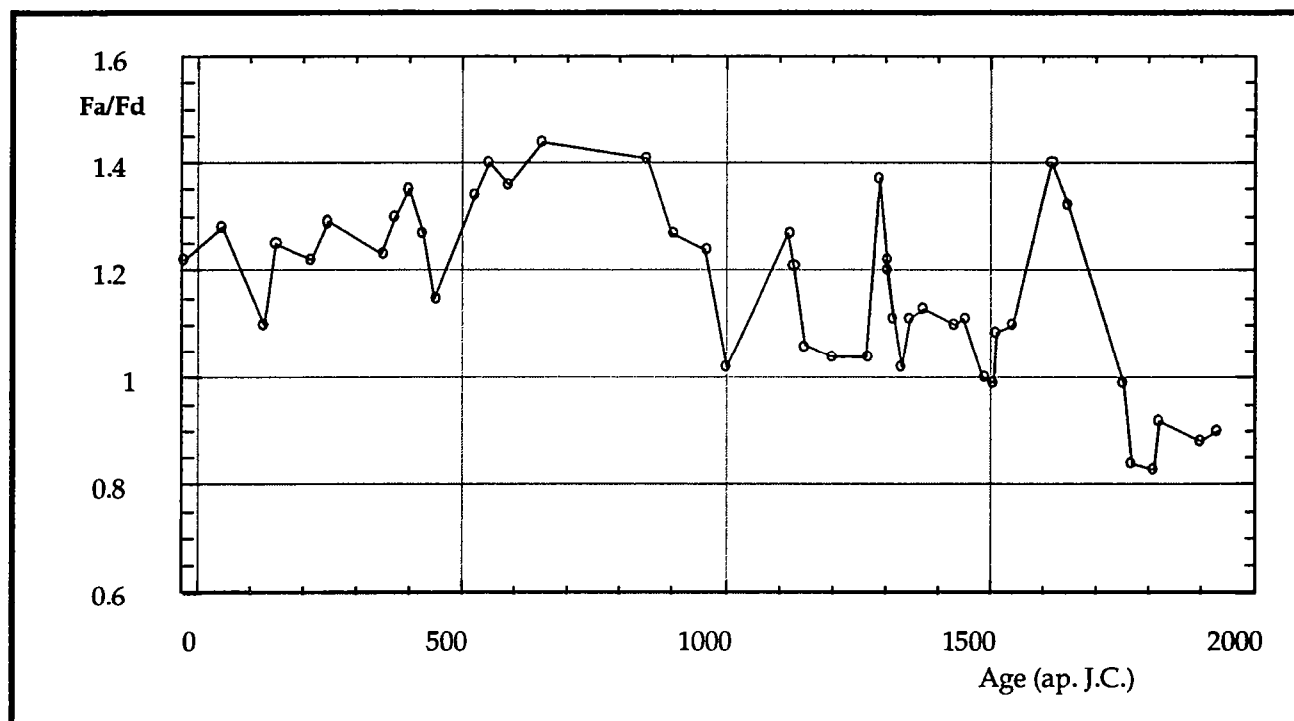


fig. V-29 : interprétation des mêmes données que celles présentées en fig. V-28, réalisée par Xanthakis et Liritzis (1991).

Notre traitement sur la période 0-600 est très proche de l'interprétation en spline naturelle de Kovacheva. La plus grande différence concerne le premier siècle trouvé en intensité décroissante par Kovacheva 1994, et interprété comme d'intensité croissante par nous. Le minimum vers 400 ans est trouvé de durée plus importante en traitement SC.

Vers 500 ap. J.C., nous trouvons un second pic qui n'apparaît pas dans l'article de Kovacheva. La période 800- 2000 nous apparaît similaire à l'interprétation par SCN sur fenêtre de 50 ans.

### **V-9-3 Confrontation des courbes d'intensité (fig. V-27)**

Le manque de données sur l'Europe de l'Ouest entre 500 et 1100 ap.J.C., ainsi que pour la Bulgarie entre 650 et 800 gêne considérablement la comparaison. Sur la période moderne la disparité est considérable

Telles qu'elles sont interprétées ici il est très difficile de faire coller les deux courbes par concordance des maxima et minima, même en cherchant à les faire glisser une par rapport à l'autre selon la base de temps.

On remarque que les fluctuations de l'intensité apparaissent très rapides en Bulgarie mais très faibles en Europe de l'Ouest. Autre caractéristique troublante, les valeurs d'intensités obtenues en Bulgarie sont fréquemment élevées (bien qu'elles soient calculées pour la latitude de Sofia), beaucoup plus que ce que nous en connaissons de l'Europe de l'ouest. Le modèle Bloxham et Jackson, 1992, permet de calculer pour cette latitude une courbe beaucoup plus faible d'intensité, ne dépassant pas 50  $\mu$ T entre 1700 et 1900 (fig. V-2). Les valeurs élevées dont rend compte la courbe calculée pour la Bulgarie nous étonne.

### **V-9-4 Etude et comparaison de la variation séculaire de l'intensité en Grèce**

Nous avons utilisé les données grecques présentées précédemment (paragraphe V-5) pour le calcul d'une courbe spline cubique.

Le pas de fenêtre a été fixé comme auparavant à dix ans, et le meilleur alpha a été calculé. La présentation en  $F_a/F_d$  originale a été conservée (fig. V-28).

Le résultat est une courbe pour laquelle la valeur de  $f_a/f_d$  est comprise entre 0.8 et 1.4, comme dans l'interprétation initiale de Xanthakis et Liritzis (fig. V-29).

L'interprétation en SC présente une courbe plus adoucie que la courbe Xanthakis et Liritzis (fig. V-29). Comparée à la spline sur les données Bulgare (fig. V-26) cette nouvelle interprétation présente moins de variation rapide. Un point commun est observé : un pic en 1600 ap. J.C.

Comparée à la courbe européenne on peut noter un point commun en vers 100 ap. J.C.

A la différence des données bulgares nous ne pouvons pas comparer les variations de l'inclinaison et de déclinaison. Il est d'ailleurs curieux qu'aucune courbe de variation séculaire d'une de ces variables n'ait été établie pour la Grèce.

## **V-10 Conclusion sur les comparaisons des courbes de déclinaison, inclinaison et intensité**

Le traitement spline cubique que nous appliquons sur les données semble efficace comme l'a montré la comparaison faite entre nos courbes établies sur les variations directionnelles et celles obtenues par d'autres auteurs (fig. V-10 et V-16, V-15 et V-16 par exemple).

Il apparaît clairement que la comparaison des données directionnelles est plus aisée que la comparaison des données d'intensité beaucoup moins nombreuses, notamment sur l'Europe de l'Ouest. De plus les données d'intensité présentent souvent une dispersion importante, pouvant être liée en grande partie à des problèmes expérimentaux.

Nous avons comparés les courbes de variation de l'inclinaison et de déclinaison de la France et de la Bulgarie. Celles-ci présentent des analogies importantes quant à la succession des événements type maximum et minimum.

Bien que l'on ait peu d'éléments sur la courbe de variation de l'intensité en Europe de l'ouest, on note un maximum en 180 ap. J.C. qu'on peut comparer à un maximum en 220 sur la courbe bulgare (fig. V-27) et à des maxima relatifs sur les courbes d'Ukraine et du Caucase entre le premier et le troisième siècle (fig. V-8).

De plus sur la courbe européenne nous observons une décroissance régulière de l'intensité de 1400 à 1500, bien marquées qui pourrait servir de repère.

Une autre différence de taille est l'absence de variations rapides d'intensité en Europe de l'ouest, comparables à celles observées sur la courbe bulgare pendant la période moderne.

## **V-11 Conclusion sur les variations de l'intensité**

Afin d'obtenir une meilleure connaissance de la variation de l'intensité du CMT, en France, nous avons réuni nos résultats aux données précédemment publiées par d'autres chercheurs sur l'Europe de l'Ouest.

La dispersion de ces données, conjuguée à l'hétérogénéité de leur répartition dans le temps, ont été un frein à la reconstruction de la courbe de variation. Une échelle de pondération a par la suite été établie afin de dégager de l'ensemble des données celles auxquelles nous pouvions apporter le plus de confiance. Compte tenu de ces données, l'allure de la courbe de variation n'est définissable

que sur la période gallo-romaine et beaucoup plus tard dans la période Moderne, à partir du quatorzième siècle.

Sur ces données pondérées nous avons appliqué un traitement mathématique du type spline cubique. Il s'agissait non seulement de pouvoir différencier chaque donnée en fonction de son poids, mais aussi d'essayer d'interpoler dans le temps l'allure de la courbe.

Pour l'Europe de l'Ouest la courbe obtenue présente quelques caractéristiques : un maximum situé en 160-180 ap. J.C. et une décroissance régulière entre 1400 et 1500. La base de données européenne doit toutefois être complétée par l'acquisition de nouvelles données notamment entre 500 et 1200 ap. J.C.

Les travaux de Kovacheva nous ont paru intéressants de par la méthode d'acquisition employée, similaire à la notre, et par la quantité de données réunies, couvrant la période de 0 à 2000 ap. J.C., notre centre d'intérêt. Afin de se placer dans des conditions expérimentales identiques nous avons appliqué à ces données le même tri et le même traitement en SC. Le résultat est une courbe similaire à l'interprétation en SCN de Kovacheva.

Malheureusement peu de points communs semblent exister entre nos portions de courbe européenne et la courbe réinterprétée de Kovacheva.

Nous savons que certaines données anciennes (antérieures aux années 1980) ne sont pas corrigées d'effets tels que l'anisotropie d'ATR ou l'effet de la vitesse de refroidissement, car ces facteurs de perturbation n'étaient pas répertoriés à l'époque des expérimentations.

Par exemple pour l'Europe occidentale, nous devrions en fait supprimer toutes les données qui ne sont pas mentionnées comme ayant été corrigées. Dans ce cas seules 83 mesures seraient conservées après ce tri. Après un tri en fonction d'une pondération supérieure ou égale à 12, il ne resterait plus que nos propres données ainsi que les données d'observatoires. C'est dire l'état de pauvreté de la base de donnée concernant l'archéointensité en Europe Occidentale.

On retrouve le même problème dans les travaux de Liritzis et Xanthakis sur la Grèce qui sont obligés de compléter leur base de travail avec des résultats étrangers.

A contrario la comparaison des courbes de référence, déclinaison et inclinaison, pour la France et la Bulgarie s'avère positive, montrant bien la qualité de ces données directionnelles, même si toutefois des divergences d'interprétation sont encore notées pour la période gallo-romaine sur la courbe de référence pour la France.

La disparité des courbes de référence d'intensité nous paraît comme un signe révélateur de la difficulté d'acquisition de données fiables d'intensité.

Nous avons vu toutefois dans les chapitres précédents que l'utilisation précautionneuse, avec toutes les corrections requises, d'une méthode comme celle définie par Thellier et Thellier en 1959, peut apporter des résultats, qui par leur répétition et leur convergence, nous apparaissent fiables. Une précision sur l'estimation de 5 à 10 % de l'intensité nous semble accessible. Seul un grand nombre de données permettra l'établissement d'une courbe de référence suffisamment précise pour mettre en évidence d'éventuelles faibles variations (comme celles peut-être observées sur la période gallo-romaine).

Un problème demeure dans l'établissement d'une courbe de référence : l'incertitude parfois élevée sur l'âge du matériel utilisé.

La méthode de datation archéomagnétique actuelle présente encore des insuffisances. Bien que les techniques d'acquisition des caractéristiques archéomagnétiques semblent au point, le consensus sur les bases de données et sur les allures des courbes de variation de l'inclinaison n'est pas encore parfait.

L'évolution d'une telle technique pourrait se réaliser par un retour d'information de la part des archéologues, afin de préciser ou de réfuter les datations archéomagnétiques, afin d'affiner les données de base, et alors nous pourrions imaginer la construction en parallèle des trois courbes de référence inclinaison, déclinaison et intensité.



## Résumé et conclusion

Le sujet de cette étude, la variation de l'intensité du champ magnétique terrestre (CMT) en France durant les deux derniers millénaires, a pour but de répondre aux besoins exprimés par les géomagnéticiens, pour l'étude de la variation séculaire du champ et des mouvements de matière dans le noyau, et par les archéomètres, pour l'utilisation de l'intensité du champ comme paramètre discriminant pour la datation par archéomagnétisme.

Si les évolutions des directions sont bien connues pour les deux derniers millénaires en France les données concernant la variation de l'intensité sont encore trop sporadiques ou peu fiables pour permettre d'en réaliser une synthèse.

Ce travail a donc porté sur les possibilités d'acquérir de nouvelles données à partir de l'étude de terres cuites archéologiques.

L'aimantation rémanente dans les terres cuites manufacturées étant d'origine thermorémanente (Aimantation Thermorémanente ou ATR), l'acquisition des données d'intensité passe par des chauffes contrôlées en laboratoire. La méthode des doubles chauffes dite Thellier-Thellier a été choisie car elle permet de contrôler l'évolution des échantillons en fonction de la température et apporte ainsi une plus grande fiabilité dans les mesures. Différents tests ont été consacrés à l'amélioration de cette procédure dans le cas des terres cuites : étude de l'atmosphère de chauffe la moins destabilisatrice de la minéralogie magnétique, corrections d'effets tels que l'anisotropie de l'ATR et la variation de l'acquisition de l'aimantation en fonction de la vitesse de refroidissement. Toutes ces conditions réunies nous obtenons d'excellents résultats.

23 sites de 11 à 12 échantillons ont été analysés. 2 ont dû être rejetés. Ces lots ont été sélectionnés soit afin de couvrir les périodes de maxima et minima de la courbe de variation de l'inclinaison durant l'époque gallo-romaine (de 20 BC à 410 AD en 20 sites), soit pour jalonner quelques périodes plus tardives (1340-1400, 1400-1470, 1650-1750 ap. J.C.). L'absence de sites de références fiables (en datation et provenance) datés entre 500 et 1300 ap. J.C. devrait être temporaire.

Une précision de l'ordre de 5 à 10% (5 à 10  $\mu$ T) du champ estimé par lots est atteinte, et les résultats obtenus pour des âges proches sont cohérents.

Ces données ont été introduites dans une base de donnée regroupant l'ensemble des résultats publiés pour l'Europe de l'Ouest. Différents modes de traitements ont été appliqués afin de préciser l'allure de la courbe de variation durant ces vingt derniers siècles, permettant de dégager les principales tendances durant la période gallo-romaine et depuis le douzième siècle.

Durant l'Antiquité l'intensité du champ magnétique terrestre, 1.3 fois plus élevée qu'à l'actuel, aurait faiblement varié, atteignant un maximum vers 200 à 300 ap. J.C. Depuis la fin du Moyen-Age, elle aurait décru plus ou moins régulièrement, avec des valeurs variant de 65 à 50  $\mu$ T.

Ces variations, bien que faibles comparées à la précision des estimations, permettraient néanmoins de différencier des sites dont la datation par archéomagnétisme "classique", en direction, pose problème à cause de solutions multiples.

## références bibliographiques

- Aitken M. J., Alcock P. A., Bussel G. D., Shaw C. J., 1981, Archaeomagnetic determination of the past geomagnetic intensity using ancient ceramics : allowance for anisotropy, *Archaeometry*, 23, 1, pp 53-64.
- Aitken M. J., Allsop A. L., Bussel G. D., Winter M., 1988, Determination of the intensity of the Earth's magnetic field during archaeological times : reliability of the Thellier technique, *Reviews of Geophysics*, vol 26, 1, pp 3-12.
- Aitken M. J., Allsop A. L., Bussel G. D., Winter M., 1989, Geomagnetic variation during the last 4000 years, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 56, pp 49-58.
- Aitken M.J., Allsop A.L., Bussel G. D., Winter M., 1986, Paleointensity determination using the Thellier technique : reliability criteria, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, pp 1353-1363.
- Aitken M.J., Pesonen L.J., Leino M., 1991, The Thellier Palaeointensity Technique : Minisamples versus Standard Size, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, pp 325-331.
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouél J-L., Saraco G., 1995, Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis, *Journal of Geophysical Research*, 100, B7, pp 12557-12575.
- Barbetti M., 1976, Archaeomagnetic Analyses of Six Glozelian Ceramic Artifacts, *Journal of Archaeological Science*, 3, pp 137-151.
- Barraclough, 1974, Spherical Harmonic Analyses of The Geomagnetic Field for Eight Epochs between 1600 and 1910, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 36, pp 497-513.
- Barton C.E., Merrill R.T., Barbetti M., 1979, Intensity of the earth's magnetic field over the last 10.000 years, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 20, pp 96-110.
- Bauer L. A., 1899, On the secular motion of a free magnetic needle. II., *Phys. Rev.*, 3, pp 34-38.
- Biquand D., 1994, Effet de la vitesse de refroidissement sur l'intensité de l'aimantation thermorémanente : étude expérimentale, conséquences théoriques, *Can. J. Earth Sci.*, vol. 31, pp 1342-1352.
- Bloxham J., Jackson A., 1992, Time-dependent mapping of the magnetic field at the core-mantle boundary, *Journal of Geophysical Research*, 97, B13, pp 19537-19563.
- Bloxham J., Gubbins D., 1990, L'évolution du champ magnétique terrestre, *Pour La Science*, n°148, pp 82-89.
- Bouchez R., Coey J.M.D., Coussement R., Schmidt K.P., Van Rossum M., Aprahamian J., Deshayes J., 1974, Mössbauer study of firing conditions used in the manufacture of the grey and red ware of Tureng-Tepe, Coll C6, Sup. au N°12, Tome 35, Déc 74, *Journal de Physique*, pp C6-541-C6-546
- Boyd M., 1986, A new method for measuring palaeomagnetic intensities, *Nature*, 319, pp 208-209.
- Bucur I., 1986, Fourteenth century archaeomagnetic field directions from widely distributed sites in France, *Proceeding of the 24th International Archaeometry Symposium*, J.S. Olin and Blackman editors, Smithsonian Institution Press, Washington, pp 449-458.
- Bucur I., 1994, The direction of the terrestrial magnetic field in France, during the last 21 centuries. Recent progress. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 87, pp 95-109.
- Bullard E.C., Freedman C., Gellman H. and Nixon J., 1950, The westward drift of the earth's magnetic field, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A243, 67.
- Burlatskaya S.P., 1986, Archaeomagnetic determinations of geomagnetic field elements, world data. Soviet Geophysical Committee of the USSR Academy of Sciences, Moscow.
- Butler R. F., 1992, *Paleomagnetism : Magnetic Domains to Geologic Terranes*, Blackwell Scientific Publications, ISBN 0-86542-070X.
- Camps P., 1994, Comportement du Champ magnétique de la Terre au cours de ses renversements : Etude d'un exemple, Variations Ultra Rapides et Caractéristiques Statistiques Globales, Thèse présentée à l'Université de Montpellier II.
- Chauvin A., 1989, Intensité du champ magnétique terrestre en périodes stables et de transition, enregistrée par des séquences de coulées volcaniques du quaternaire, Mémoires et documents du Centre Armoricaïn d'Etude Structurale des socles, LP CNRS n°4661, Université de Rennes I, ISSN 0755-978 X, ISBN 2-905532-22-X
- Cibois P., 1987, *L'Analyse Factorielle*, Coll. Que sais-je ?, Presses Universitaires de France.

- Coe R. S., Grommé S., Mankinen E. A., 1978, Geomagnetic Paleointensities from Radiocarbon-Dated Lava Flows on Hawaii and the Question of the Pacific Nondipole Low, *Journal of Geophysical Research*, 83, B4, pp 1740-1756.
- Coe R., 1967, The Determination of Paleo-Intensities of the Earth's Magnetic Field with Emphasis on Mechanisms which Could Cause Non-ideal Behavior in Thellier's Method, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 19, 3, pp 157-179.
- Constable C. G., Tauxe L., 1987, Palaeointensity in the pelagic realm : marine sediment data compared with archaeomagnetic and lake sediments records, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 90, pp 43-59.
- Courtillot V., Valet J.P., 1995, Secular variation of the Earth's magnetic field : from jerks to reversals, *C.R. Acad. Sci. Paris*, t 320, série Ila, pp 903-922.
- Courtillot V., Le Mouél J. L., 1988, Time variations of the earth's magnetic field : from daily to secular, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16, pp 389-476.
- Cui Y, Verosub K. L., 1995, A mineral study of some pottery samples : possible implications for sample selection in archaeointensity studies, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91, pp 261-271.
- Dagley P., Lawley E., 1974, Palaeomagnetic evidence for the transitionnal behavior of the geomagnetic field, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 36, pp 577-598.
- Daly L., Le Goff M., 1996, An updated and homogeneous world secular variation data base. 1-Smoothing of the archaeomagnetic results, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93, pp 159-190.
- Daly L., 1970, Etude des propriétés des roches métamorphiques ou simplement tectonisées. Nature de leur aimantation naturelle. Détermination de leur anisotropie magnétique et application à l'analyse structurale, Thèse, Paris, 340 pp.
- Daly L., Zinsser H., 1973, Etude comparative des anisotropies de susceptibilité et d'aimantation rémanente isotherme. Conséquences pour l'analyse structurale et le paléomagnétisme. *Ann. Géophys.*, 29, pp 189-200.
- Dodson M.H. et Mc Clelland E., 1980, Magnetic blocking temperatures of simple domain grains during slow cooling, *Journal of Geophysical Research*, 85 (B5), pp 2625-2637.
- Dunlop D.J., 1981, The rock magnetism of fine particles, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 26, pp 1-26.
- Dunlop D.J., 1983, determination of domain structure in igneous rocks by alternating field and other methods, *Earth and Planetary Science Letters*, 63, pp 353-367.
- Evans M. E., 1986, Paleointensity estimates from italian kilns, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, pp 1259-1267.
- Evans M. E., 1991, An Archaeointensity Investigation of a kiln at Pompeii, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, pp 357-361.
- Fisher R. A., 1953, Dispersion on a sphere, *Proc. Roy. Soc. London*, A217, 295.
- Fox J.M.W., Aitken M.J., 1980, Cooling-rate dependance of thermoremanent magnetisation, *Nature*, vol. 283, pp 462-463.
- Games K. P., Baker M. E., 1981, Determination of geomagnetic archaeomagnitudes from clay pipes, *Nature*, 289, pp 478-479.
- Games K. P., Davey, P. J., 1985, Archaeomagnitude determinations for Britain and south-west USA from 600 AD to 1700 AD and their implications for medieval pottery studies, *Medieval Ceramics*, 9, pp 43-50.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H., 1995a, A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal, *nature*, 377, pp 203-209.
- Glatzmaier G. A., Roberts P. H., 1995b, A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 91, pp 63-75.
- Goulpeau L., Langouët L., Bardel J.P., Bucur I., 1982, Possibilités de l'archéomagnétisme dans l'étude d'un four de tuilier, *Revue d'Archéométrie*, 6, pp 13-25.
- Goulpeau L., Langouët L., 1983, Les datations en laboratoire, in *Les fouilles archéologiques du bastion de Solidor, St Malo, Dossiers du CeRAA, F-1983*, pp 51-60
- Goulpeau L. et Langouët L., 1980, Datations d'apport de tuiles et briques sur des sites gallo-romains à l'aide de mesures archéomagnétiques opérées sur d'abondants échantillonnages, *Revue d'Archéométrie*, 4, pp 153-164.

- Goulpeau L., Lanos P., Langouët L., 1989, The anisotropy as a disturbance of the archaeomagnetic dating method, *Archaeometry*, Proceeding of the 25th International Symposium, Elsevier Publishers, pp 45-58.
- Grais B., 1974, nouveau tirage 1988, méthodes statistiques, série économie / "module", éd. Dunod.
- Green et Silvermann, 1994, Nonparametric Regression and Generalized Linear Models, A roughness penalty approach, *Monographs on Statistics and Applied Probability*, 58, published by Chapman & Hall, ISBN 0 412 30040 0.
- Gubbins D., Bloxham J., 1987, Morphology of the geomagnetic field and implications for the geodynamo, *Nature*, 325, pp 509-511.
- Hedley I. G., Wagner J.-J., 1990, *Archaeometry '90*, Edited by Ernst Pernicka et Günther A. Wagner, © Birkhäuser Verlag Basel.
- Hess J., Perlman I., 1974, Mössbauer spectra of iron in ceramics and their relation to pottery colours, *Archaeometry*, 16, 2, pp 137-152.
- Hrouda F., 1982, Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics, *Geophysical Surveys*, 5, pp 37-82.
- Hulot G., 1992, Observations géodynamiques et géodynamo, Thèse, Université de Paris VII.
- Hulot G., Le Mouél J.L. 1994, A statistical approach to the Earth's main magnetic field, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82, pp 167-183.
- Janot C., Delcroix P., 1974, *Journal de Physique*, Colloque C6, supplément au n°12, 35, pp C6-557 - C6-561.
- Khodair A. A., Coe R. S., 1975, Determination of geomagnetic palaeointensities in vacuum, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42, pp 107-115.
- Kono M., Tanaka H., 1977, Influence of partial pressure of oxygen on thermoremanent magnetization of basalts, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, pp 276-288.
- Kono M., 1978, Reliability of palaeointensity method using alternating field demagnetization and anhysteretic remanence, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 54, pp 241-261.
- Kovacheva M and Toshkov A., 1994, Geomagnetic field variation as determined from Bulgarian archaeomagnetic data, Part I: The last 2000 years AD, *Surveys in Geophysics*, 15, pp 673-701.
- Kovacheva M., 1980, Summarized results of the archaeomagnetic investigation of the geomagnetic field variation for the last 8000 yr in south-eastern Europe, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 61, pp 57-64.
- Kovacheva M., 1992, Updated archaeomagnetic results from Bulgaria : the last 2000 years, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 70, pp 219-223.
- Kovacheva M., Pares J., Jordanova N., Karloukovski V., 1995, A new contribution to the archaeomagnetic study of a Roman pottery kiln from Calahorra (Spain), *Geophys. J. Int.*, 123, pp 931-936.
- Kovacheva M., Toshkov A., 1994, Geomagnetic field variations as determined from Bulgarian archaeomagnetic data. Part I : the last 2000 years AD. *Surveys in Geophysics*, 15, pp 673-701.
- Lagios E., Liritzis I., Sotiropoulos P., 1992, A global archeointensity data bank, National and Kapodistrian university of Athens, Department of Geophysics & Geothermy, Publication N° 3/92.
- Laj C., Mazaud A., 1993, Les inversions du champ magnétique terrestre et la structure profonde de notre planète, *Images de la physique 1993*, C.N.R.S.
- Laj C., Mazaud A., Weeks R., Fuller M., Herrero-Bervera E., 1991, Geomagnetic reversal paths, *Nature*, 351, p 447.
- Langouët L., Berson M.P., Goulpeau L., Piron F., 1980, Fouille, Datation et étude de l'édifice gallo-romain des Sables d'Or (22), *Les dossiers du Centre Régional Archéologique d'Alet (CeRAA)*, 8, pp 1-36.
- Langouët L., 1983, Les fouilles archéologiques du bastion de Solidor, St Malo, *Dossiers du CeRAA*, F-1983, pp 51-60.
- Langouët L., Bucur I., Goulpeau L., 1983, Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France, nouveaux résultats archéomagnétiques, *Revue d'Archéométrie*, 7, pp 37-43.
- Lanos P., 1987a, Archéomagnétisme des matériaux déplacés, application à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie, these Université de Rennes I.
- Lanos P., 1987b, The effects of demagnetising fields on thermoremanent magnetization acquired by parallel-sided baked clay blocks, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 91, pp 985-1012.

- Lanos P., 1990, La datation archéomagnétique des matériaux de construction d'argile cuite, *Apports chronologiques et technologiques*, Gallia, 47, pp 321-341.
- Lanos P., 1994, Pratiques artisanales des briquetiers et archéomagnétisme des matériaux d'argile cuite. Une histoire de positions de cuisson. *Histoire et Mesure*, IX-3/4, pp 287-304.
- Laubenheimer F., 1990, Sallèles-d'Aude, Un complexe de potiers gallo-romain : le quartier artisanal, *Documents d'Archéologie Française (dAf)*, n°26, Editions de la Maison des Sciences de l'Homme.
- Laubenheimer F., 1992, Sallèles-d'Aude, Atelier de Potiers Gallo-romain du clots de Raynaud, résumé du rapport de fouille.
- Laubenheimer F., Lanos P., 1994, Chronologie des fours de potiers de Sallèles-d'Aude, *Archéomagnétisme et Archéologie*, 1st European workshop on archaeological ceramics, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Scienza della Terra, pp 251-267.
- Le Goff M., 1990, Lissage et limites d'incertitude des courbes de migration polaire : pondération des données et extension bivariate de la statistique de Fisher, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 311, Sée. III, pp 119-198.
- Le Mouél J. L., 1986, La variation séculaire du champ magnétique terrestre et les mouvements dans le noyau, *La vie des sciences*, C. R. Acad. Sci. Paris, 3, 5, pp 451-468.
- Le Ny F., 1988, Les fours de tuiliers gallo-romains, *Documents d'Archéologie Française*, n°12, Paris, MSH, 138p
- Levi S., 1977, The effect of magnetite particle size on paleointensity determinations of the geomagnetic field, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, pp 245-259.
- Liritzis Y., Kovacheva M., 1992, Some evidence for sharp changes in the archaeomagnetic intensity variation during the last 2000 years, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 70, pp 85-89.
- Longworth G., Tite M. S., 1977, Mössbauer and magnetic susceptibility studies of iron oxides in soils from archaeological sites, *Archaeometry*, 19, 1, pp 3-14.
- Lowrie W., 1990, Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties, *Geophysical Research Letters*, 17, 2, pp 159-162.
- Lowrie W., Fuller M., 1971, On the alternating field demagnetization characteristics of multidomain thermoremanent magnetization in magnetite, *Journal of Geophysical Research*, 76, 26, pp 6339-6349.
- Mankinen E. A., Prévot M., Grommé C. S., 1985, The Steens Mountain (Oregon) Geomagnetic Polarity Transition 1. Directional history, duration of episodes and rock magnetism, *Journal of Geophysical Research*, 90, B12, pp 10393-10416.
- Mankinen, 1985
- Mayes P., 1962, The firing of a second pottery kiln of romano-british type at Boston, Lincolnshire, *Archaeometry*, 5, pp 80-85.
- Mc Clelland Brown E., 1984, Experiments on TRM intensity dependence on cooling rate, *Geophysical Research Letters*, vol. 11, n°3, pp 205-208.
- Mc Elhinny M.W. and Sennayake W.E., 1982, Variations in the Geomagnetic Dipole 1: The Past 50 000 Years, *J. Geomag. Geoelect.*, 34, pp 39-51.
- Mc Fadden P. L., 1981, The discrimination of mean directions drawn for Fisher distributions, *Geophys. J. of the Roy. Astr. Soc.*, 34, pp 163-189.
- Menvielle et al., 1987, "observations magnétiques", Chambon-la-Forêt 1986, Université Pierre et Marie Curie, 1987
- Merrill & Mc Fadden, 1995, Dynamo theory and paleomagnetism, *Journal of Geophysical Research*, 100, B1, pp 317-326.
- Merrill R. T. & Mc Elhinny M.W., 1983, The Earth's Magnetic Field, *International Geophysics Series*, V. 32, Academic Press Inc. (London) LTD.
- Merrill R.T., 1981, Toward a better theory of thermal remanent magnetization, *Journal of Geophysical Research*, 86 (B2), pp 937-949
- Meynadier L., Valet J.-P., Bassinot F. C., Shakhleton N., Guyodo Y., 1994, Asymmetrical saw-tooth pattern of the geomagnetic field intensity from equatorial sediments in the Pacific and Indian Oceans, *Earth and Planetary Science Letters*, 126, pp 109-127.
- Moskowitz B. M., 1981, Methods for estimating curie temperatures of titanomagnetites from experimental Js-T data, *Earth and Planetary Science Letter*, 53, pp 84-88.
- Néel L., 1949, Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites, *Annales de Géophysique*, 5, pp 99-136.

- Néel L., 1955, Some theoretical aspects of rock-magnetism, *Advance in Physics*, 4, pp 191-243.
- Pick T., Tauxe L., 1993, Holocene Paleointensities : Thellier experiments on submarine basaltic glass from the east pacific rise, *Journal of Geophysical Research*, 98, B10, pp 17949-17964.
- Pick T., Tauxe L., 1994, characteristics of magnetite in submarine basaltic glass, *Geophys. J. Int.*, 119, pp 116-128.
- Prévot M., Camps P., 1993, Absence of preferred longitude sectors for poles from volcanic records of geomagnetic reversals, *Nature*, 366, pp 53-57.
- Prévot M., Mankinen E. A., Coe R. S., Grommé C. S., 1985, The Steens Mountain (Oregon) Geomagnetic Polarity Transition 2. Field Intensity Variations and Discussion of Reversal Models, *Journal of Geophysical Research*, 90, B12, pp 10417-10448.
- Ramaswamy K., Dheenathayalu M., Barathan S., 1989, Mössbauer study of some archaeological materials in Tamilnadu (India), *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 56, pp 230-241.
- Reinsch C., 1967, Smoothing by spline functions, *Numerical Mathematics*, 10, pp 177-183.
- Roberts A.P. Cui Y., Verosub K.L., 1995, Wasp-waisted hysteresis loops: mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems, *Journal of Geophysical Research*, 100, B9, pp 17909-17924.
- Rogers J., Fox J. M. W., Aitken M. J., 1979, Magnetic anisotropy in ancient pottery, *Nature*, 277, pp 644-646.
- Rolph T. C., Shaw J., 1985, A new method of palaeofield magnitude correction for thermally altered samples and its application to Lower Carboniferous lavas, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 80, pp 773-781.
- Rolph T. C., Shaw J., 1986, Variations of the Geomagnetic Field in Sicily, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, pp 1269-1277.
- Senanayake W.E., Mc Elhinny M.W., 1981, Hysteresis and susceptibility characteristics of magnetite and titanomagnetites : interpretation of results from basaltic rocks, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 26, pp 47-55.
- Shaw J., 1974, A New method of determining the magnitude of the palaeomagnetic field, application to five historic lavas and five archaeological samples, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 39, pp 133-141.
- Shaw J., 1979, Rapid changes in the magnitude of the archaeomagnetic field, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 58, pp 107-116.
- Shaw J., Share J. A., 1984, An automated superconducting magnetometer and demagnetizing system, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 78, pp 209-217.
- Shaw J., Walton D., Yang S., Rolph T. C., Share J.A., 1996, Microwave archaeointensities from Peruvian ceramics, *Geophys. J. Int.*, 124, pp 241-244.
- Simopoulos A., Kostikas A., Sigalas I., 1975, Mössbauer study of transformations induced in clay by firing, *Clays and clay minerals*, 23, pp 393-399.
- Smith P.J., 1967, The intensity of the ancient geomagnetic field : a review and analysis, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 12, pp 321-362.
- Stacey F. D., Banerjee S.K., 1974, *The Physical Principles of Rock Magnetism*, Elsevier, New-York, 1974
- Stacey F. D., 1967, The Koenigsberger ratio and the nature of thermoremanence in igneous rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, 2, pp 67-68.
- Stephenson A., Sadikun S., Potter D. K., 1986, A theoretical and experimental comparison of the anisotropies of magnetic susceptibility and remanence in rocks and minerals, *Geophysical J. R. astr. Soc.*, 84, pp 185-200.
- Sternberg R., 1989, Archaeomagnetic paleointensity in the American Southwest during the past 2000 years, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 56, pp 1-17.
- Tanguy J.C. , 1980, L'Etna, Etude pétrologique et paléomagnétique, implications volcanologiques, Thèse de Doctorat d'Etat, Es Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- Thellier E et Thellier O., 1959, Sur l'intensité terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Géophys.*, 15, pp 285-376.
- Thellier E., 1938, Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. Thèse de doctorat. Paris 1938, ou, *Ann. Inst. Phys. Globe Paris*, 16, pp 157-302
- Thellier E., 1981, sur la direction du champ magnétique terrestre, en France, durant les deux derniers millénaires, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 24, pp 89-132.
- Thellier E., 1971, Magnétisme interne. Dans *Encyclopédie de la Pléiade, Géophysique*, pp 235-376.

- Thibaut J., Pozzi J.-P., Barthès V., Dubuisson G., 1995, Continuous record of geomagnetic field intensity between 4.7 and 2.7 Ma from downhole measurements, *Earth and Planetary Science Letters*, 136, pp 541-550.
- Tominaga T., Takeda M., Mabuchi H., Emoto Y., 1978, Characterization of ancient Japanese roofing tiles by  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectroscopy, *Archaeometry*, 20, 2, pp 135-146.
- Tric E., Laj C., Jehanno C., Valet J. P., Kissel C., Mazaud A., Iaccarino S., 1991, High resolution record of the Upper Olduvai Transition from Po Valley (Italy) sediments : Supports for dipolar transition geometry ?, *Phys. Earth and Planet. Int.*, 97, pp 9337-9351.
- Tric E., Valet J.-P., Tucholka P., Paterne M., Labeyrie L., Guichard F., Tauxe L., Fontugne M., 1992, Palaeointensity of the geomagnetic field during the last 80.000 years, *Journal of Geophysical Research*, 97, B6, pp 9337-9351.
- Veitch R. J., Hedley I. G., Wagner J. J., 1984, An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles, *Arch. Sc. Genève*, 37, 3, pp 359-373.
- Wakba, G., 1990, Spline models for observational data, Philadelphia:SIAM
- Walton D., 1977, Archaeomagnetic intensity measurements using a squid magnetometer, *Archaeometry*, 19, 2, pp192-200.
- Walton D., 1980, Time-temperature relations in the magnetization of assemblies of single domain grains, *Nature*, vol 286, pp 245-247.
- Walton D., 1984, Re-evaluation of Greek archaeomagnitudes, *Nature*, 310, pp 740-743.
- Walton D., 1993, Microwave magnetisation, *Geophysical Research Letters*, vol 20, n°2, pp109-111.
- Wasilewski P.J., 1973, Magnetic hysteresis in natural materials, *Earth and Planetary Science Letters*, 20, pp 67-72.
- Weaver G. H., 1966, Measurement of the past intensity of the earth's magnetic field, *Archaeometry*, pp 174-186.
- White A. E. & White D., 1962, gas analysis, paru dans "the firing of a second pottery kiln of Romano-British type at Boston, Lincolnshire" par Mayes P., *Archaeometry*, 5, pp 80-107.
- White D. & White A., 1961, gas analysis, paru dans "the firing of kilns of Romano-British type : Archaeological notes" par Hartley B. R., *Archaeometry*, 4, pp 1-30.
- Xanthakis et Liritzis, 1991, Geomagnetic Field Variation as inferred from Archaeomagnetism in Greece and palaeomagnetism in British lake sediments since 7000 B.C., *Acad. Athens Publ.*, ISBN 960-7099-05-2.
- Yamazaki T., Ioka N., Eguchi N., 1995, Relative paleointensity of the geomagnetic field during the Brunhes Chron, *Earth and Planetary Science Letters*, 136, pp 525-540.
- Yang S., Shaw J., Rolph T., 1993a Archaeointensity studies of Peruvian pottery - from 1200 B.C. to 1800 A.D., *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, pp 1193-1207.
- Yang S., Shaw J., Wei Q. Y., 1993b, A comparison of archaeointensity results from Chinese ceramics using Thellier's and Shaw's palaeointensity methods, *Geophys. J. Int.*, 113, pp 499-508.
- Yukutake T. et Tachinaka H., 1968, The non-dipole part of the earth's magnetic field, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 46, 1027.
- Yukutake T., 1967, The westward drift of the earth's magnetic field in historic times, *J. Geomag. Geoelectr.*, 19, 103.
- Yukutake T., 1979, Geomagnetic secular variations on the historical time scale. *Phys. Earth Planet. Int.*, 20.
- Yukutake T., 1993, The geomagnetic non-dipole field in the Pacific, *J. Geomag. Geoelectr.*, 45, pp 1446-1453.



## Chapitre II

### "Méthodologie de l'archéointensité"

#### documents annexes

#### Tableaux récapitulatifs des valeurs :

- de gain et d'évolution,
- d'anisotropie d'Aimantation Thermorémanente,
- d'anisotropie d'Aimantation Magnétique  
de Susceptibilité,
- d'anisotropie d'Aimantation Rémanente Isotherme,
- d'anisotropie d'Aimantation Rémanente  
Anhystérétique.



**tableau récapitulatif des valeurs de gain et d'évolution**

échantillon	ARN	$\chi$	TDM	gain3	évolution	T	ATR acquise
	A/m	10 <sup>-5</sup> SI	°C	%	%	°C	%
31HL-P-8B	0.85	67	383.0	0.9	3.0	430	66
31HL-P-18B	0.97	540	270.0	8.5	-2.1	450	74
31HL-P-22B	0.82	69	360.0	2.2	2.8	430	70
31HL-P-52B	0.92	92	372.0	-0.4	3.5	430	70
31HL-P-59B	0.66	93	374.0	0.6	2.4	430	67
31HL-P-90B	1.08	554	390.0	3.5	1.4	450	62
31HL-P-92B	1.01	56	428.0	1.0	0.0	450	66
31HL-P-95B	1.34	111	367.0	5.9	0.8	450	71
31HL-RES2-11B	1.05	95	420.0	2.8	0.3	500	80
31HL-RES2-26B	1.12	76	390.0	3.5	1.1	500	83
31HL-RES2-37B	0.99	71	420.0	2.6	0.2	500	82
31HL-RES2-40B	1.20	355	438.0	4.4	-0.6	450	64
31HL-RES2-55B	1.00	82	385.0	1.3	-0.1	500	83
31HL-RES2-65B	1.09	82	455.0	2.5	0.2	450	61
31HL-RES2-78B	0.92	96	364.0	-0.8	1.0	450	74
31HL-RES2-79B	3.23	251	458.0	1.6	-2.6	450	55
31TAB1-3B	3.64	853	378.0	3.0	1.5	520	93
31TAB1-8B	3.25	1973	265.0	5.1	-1.5	460	93
31TAB1-17B	2.77	251	394.0	2.3	2.1	520	96
31TAB1-20B	1.83	234	350.0	3.2	-1.1	460	82
31TAB1-32B	2.08	128	346.0	4.1	-2.1	460	82
31TAB1-72B	4.00	216	397.0	2.7	2.8	520	98
31TAB1-80B	2.63	550	240.0	4.4	-3.1	460	88
31TAB1-81B	1.56	169	349.0	4.2	-1.0	520	88
31TAB1-87B	1.31	410	218.0	9.1	-1.6	520	93
31TAB1-92B	1.26	344	324.0	7.2	-0.4	520	93
31TAB3-9B	1.25	544	270.0	4.5	0.6	520	91
31TAB3-23B	0.49	206	300.0	1.6	1.1	520	88
31TAB3-34B	3.92	1166	338.0	5.8	-0.5	520	98
31TAB3-40B	0.68	567	271.0	6.2	-3.1	520	92
31TAB3-51B	2.92	232	343.0	2.9	0.5	520	96
31TAB3-55B	0.85	215	240.0	2.4	4.2	520	86
31TAB3-57B	0.76	171	247.0	2.3	3.6	520	88
31TAB3-61B	8.44	377	365.0	3.1	0.1	520	99
31TAB3-65B	2.52	1342	283.0	6.0	-0.2	520	96
31TAB3-67B	0.12	65	285.0	5.2	3.6	520	86
31TAB3-69B	0.76	612	209.0	7.1	3.3	520	88
49127A-62B	2.28	234	487.0	4.7	1.4	520	65
49127A-63B	7.62	686	515.0	7.4	18.5	520	55
49127A-64B	10.87	1336	495.0	3.1	3.6	520	48
49127A-69B	2.59	494	160.0	5.8	-0.9	520	97
49127A-71B	10.96	997	477.0	3.6	0.4	520	77
49127A-72B	2.96	535	428.0	4.4	1.8	520	88
49127A-73B	2.95	362	391.0	0.8	-0.9	520	78
49127A-74B	3.16	237	270.0	2.7	-0.2	520	71
49127A-75B	5.82	381	431.0	4.8	1.2	520	78
49127A-77B	5.09	575	370.8	3.6	0.6	520	94
49127A-78B	3.46	528	425.0	5.5	2.2	520	90
49127A-79B	4.81	751	445.7	1.6	2.6	520	80
53169A-12T	2.63	119	470.0	2.3	8.7	520	99
53169A-15T	5.38	508	350.0	2.6	0.4	460	86
53169A-19T	1.71	229	347.0	3.1	1.1	460	77
53169A-35T	14.74	1619	387.0	3.9	1.5	520	99
53169A-42T	3.72	507	360.0	4.9	-0.8	460	84
53169A-49T	6.22	1049	340.0	4.3	1.1	520	97
53169A-56T	4.84	722	350.0	3.9	1.9	520	95
53169A-11S	2.62	364	322.0	3.0	2.5	520	91
53169A-16S	4.54	493	440.0	4.1	-1.0	460	70

échantillon	ARN	$\chi$	TDM	gain3	évolution	T	ATR acquise
	A/m	10 <sup>-5</sup> SI	°C	%	%	°C	%
70LUX-F-2P	7.24	645	315.0	3.2	-0.3	450	98
70LUX-F-5P	3.38	199	488.0	4.7	-8.9	450	34
70LUX-F-9P	7.00	397	498.0	3.0	-0.3	450	41
70LUX-F-10P	6.50	370	435.0	7.8	-1.5	450	77
70LUX-F-12P	4.81	2032	378.0	2.9	1.7	450	85
70LUX-F-13P	13.86	3057	364.0	3.0	0.1	450	88
70LUX-F-15P	10.65	465	487.0	1.4	-1.3	450	43
70LUX-F-19P	5.55	1143	435.0	5.2	2.1	450	68
72225A-11T	7.68	1013	457.0	-0.9	1.2	450	55
72225A-12T	8.41	1852	432.0	0.9	-1.1	450	65
72225A-31T	4.07	893	432.0	5.7	0.6	500	93
72225A-44T	7.84	2558	233.0	2.7	1.5	500	93
72225A-50T	14.39	2800	455.0	3.5	-2.6	450	57
72225A-88T	5.66	1396	343.0	2.8	-0.2	500	96
72225A-91T	4.12	1480	237.0	2.6	1.1	500	87
72225A-128T	8.54	2977	364.0	3.3	-0.4	450	84
80035A-7P	1.25	388	466.0	4.4	-1.8	460	69
80035A-13P*	1.24	575		3.1	-1.1	460	91
80035A-14P	3.46	520	483.0	0.4	6.2	430	41
80035A-15P*	1.66	275		5.4	1.5	430	85
80035A-16P*	3.07	205		1.0	0.4	460	46
80035A-17P	1.89	182	499.0	8.6	-2.3	430	43
80035D-1P	22.48	3512	499.0	1.2	5.6	430	53
80035D-3P	16.73	2269	450.0	1.3	6.6	450	74
80035D-6P*	1.83	338		3.5	2.6	450	83
80035D-10P	29.51	3325	471.0	2.2	4.8	430	63
80035D-12P	3.97	339	480.0	-1.5	13.2	450	43
80035D-14P	15.81	1330	415.4	0.3	4.9	430	56
80035D-15P*	1.72	201		4.0	2.0	430	42
11SAL-A7-15A	2.69	1177	272.6	4.3	0.4	360	70
11SAL-A7-16A	5.26	1571	338.9	3.9	1.9	360	55
11SAL-A7-24A*	3.26	1041		4.4	1.8	360	74
11SAL-A7-25A*	2.99	1300		4.3	1.1	360	55
11SAL-A7-26A*	4.73	1014		-1.8	1.6	360	73
11SAL-A7-30A	3.35	1547	274.6	3.0	0.6	360	71
11SAL-A7-33A	5.16	1687	253.7	-2.0	-0.3	360	75
11SAL-A7-37A	1.67	1233	408.8	-2.8	2.0	360	34
11SAL-A7-42A	3.16	1383	302.4	-1.1	-0.9	360	66
11SAL-A7-48A	3.96	1510	249.4	-1.3	-1.5	360	75
11SAL-A7-49A	2.97	1669	293.7	-0.9	0.3	360	69
11SAL-A7-51A	3.98	1955	310.0	-2.7	0.7	360	65
11SALF3-1P	1.06	377	300.7	1.3	-0.5	360	63
11SALF3-2P	1.24	72	233.0	6.5	-0.7	360	76
11SALF3-3P*	3.15	911		1.0	-0.8	360	64
11SALF3-4P	1.21	412	260.8	0.5	-0.8	360	69
11SALF3-5P	2.35	107	250.4	3.4	-0.5	360	83
11SALF3-6P	2.24	93	353.2	2.2	-1.8	360	53
11SALF3-7P	9.08	657	244.0	5.1	-1.1	360	96
11SALF3-8P	4.58	249	310.4	3.2	-0.9	360	61
11SALF3-8PA	4.61	245	314.5	2.7	-0.5	360	60
11SALF3-9P	0.64	373	288.0	9.3	-3.3	360	65
11SALF3-10P	1.04	258	318.1	6.1	-1.1	360	60
11SALF3-11P	1.51	483	302.8	8.6	-2.0	360	60
11SALF7-1P0	5.71	830	345.6	4.7	0.1	360	54
11SALF7-1P1	5.45	778	362.4	1.9	3.1	360	50
11SALF7-2P0	11.69	1259	331.5	1.2	15.2	360	58
11SALF7-2P1	0.73	616	200.3	4.5	-1.9	360	87
11SALF7-3P2	1.67	550	252.2	2.9	-0.8	360	73
11SALF7-5P0	1.02	67	237.8	2.4	-0.3	360	85
11SALF7-9P0	2.47	588	270.9	3.6	1.2	360	75
11SALF7-9P1*	1.16	613		4.1	-1.8	360	91
11SALF7-10P1	4.89	607	238.2	2.0	1.8	360	81
11SALF7-15P0	8.31	1172	388.7	5.8	-3.0	360	41

échantillon	ARN	$\chi$	TDM	gain3	évolution	T	ATR acquise
	A/m	$10^{-5}$ SI	°C	%	%	°C	%
11SALF8-1Pb*	1.87	888		1.9	0.2	380	93
11SALF8-1Pc*	1.99	894		3.1	-1.2	380	93
11SALF8-2Pb*	1.51	333		1.9	-0.4	380	87
11SALF8-3Pa	8.94	630	437.6	-4.3	-1.3	380	46
11SALF8-3Pa'	9.57	651	446.1	-7.8	2.5	380	43
11SALF8-4Pa	3.09	670	289.7	-2.2	0.1	380	86
11SALF8-5Pa	4.85	944	376.7	0.4	-0.2	380	66
11SALF8-10Pa	3.73	642	376.7	-1.7	0.2	380	67
11SALF8-10Pb	2.23	507	325.0	-2.6	1.3	380	77
11SALF8-13Pa	2.32	812	224.7	-1.2	2.0	380	92
11SALF8-13Pb	1.98	521	207.1	2.2	3.2	380	88
11SALF8-18Pb	5.41	377	376.2	-1.9	0.7	380	67
11SALF9-3P	1.01	157	348.5	4.9	-0.4	420	69
11SALF9-5P	3.44	353	482.1	9.1	-0.7	420	29
11SALF9-6P	2.45	223	472.7	8.2	-0.9	420	34
11SALF9-7P	1.12	203	396.7	5.5	-0.9	420	55
11SALF9-8P	1.41	151	442.2	2.7	-1.8	420	44
11SALF9-10P	1.44	420	475.1	5.8	-3.2	420	42
11SALF9-12P	3.61	759	452.9	2.2	-0.4	420	42
11SALF9-15P	2.25	646	341.5	5.6	0.5	420	69
11SALF9-16P	1.65	400	401.5	5.9	0.1	420	54
11SALF9-18Pa	2.56	465	468.9	6.9	0.7	420	38
11SALF9-18Pb	1.49	369	417.9	0.0	0.1	420	50
11SALF9-20P	1.47	426	275.7	0.0	2.1	420	89
11SALF10-1P2	2.15	565	245.9	3.5	1.7	350	76
11SALF10-2P2	2.10	428	300.4	3.5	-0.5	350	63
11SALF10-3P5	2.90	182	250.5	2.3	-1.0	350	79
11SALF10-9P2	3.18	201	304.1	1.7	-0.8	350	61
11SALF10-10P3	2.32	333	308.3	2.2	-0.4	350	64
11SALF10-12P1	0.88	59		-2.5	-2.2	350	29
11SALF12-2P	1.41	320	348.2	-0.8	1.8	400	79
11SALF12-3P	1.66	334	332.1	0.4	1.2	400	83
11SALF12-5P	1.53	417	332.5	-1.7	1.7	400	80
11SALF12-9P	2.77	165	289.7	0.5	1.7	400	91
11SALF12-10P	2.97	459	303.7	0.6	0.6	400	85
11SALF12-11P	1.32	356	348.8	-1.6	2.7	400	71
11SALF12-12P	1.50	347	301.7	-0.1	1.8	400	83
11SALF12-13P	5.11	271	425.9	1.4	-0.8	400	65
11SALF12-14P	3.85	329	269.0	0.8	2.3	400	91
11SALF12-15P	1.37	388	294.4	-0.7	3.4	400	91
11SALF12-15P'	1.60	395	288.6	-1.0	1.6	400	91
11SALF12-18P	2.20	432	301.0	-2.4	3.0	400	87
11SALF14-1Pc	1.52	65	317.6	1.5	-0.4	500	94
11SALF14-3Pb'	2.08	72	256.6	2.4	0.1	500	96
11SALF14-9Pa	1.33	64	254.1	2.4	0.9	500	88
11SALF14-10Pb	1.92	109	225.9	3.6	1.4	500	87
11SALF14-12Pb	2.92	127	349.5	0.4	-0.2	500	95
11SALF14-17Pb'	1.98	79	287.9	2.2	0.6	500	97
11SALF15-1P	6.75	974	371.2	1.4	2.9	360	45
11SALF15-3P	2.09	555	249.4	1.1	0.7	360	80
11SALF15-4P	1.69	371	281.1	2.9	-0.3	360	70
11SALF15-6P	1.65	558	235.1	0.5	0.5	360	91
11SALF15-10P	3.86	426	370.6	-0.3	2.8	360	46
11SALF15-11P	2.45	396	350.6	1.7	2.1	360	53
11SALF15-12P	2.70	136	435.5	4.0	-0.3	360	26
11SALF15-15P	2.70	142	454.4	4.0	0.5	360	26
11SALF15-17P	1.81	280	280.4	1.6	-0.7	360	77
11SALF15-18P	3.85	400	386.1	5.1	0.1	360	42
11SALF15-19P	2.58	147	430.2	4.0	0.4	360	25
11SALF15-20P	3.92	640	366.3	3.4	-0.2	360	48

tableau récapitulatif des valeurs de gains et évolutions calculées pour tous les échantillons utilisés en détermination de l'archéointensité. ARN, aimantation rémanente naturelle,  $\chi$ , susceptibilité mesurée à température de pièce, TDM, température pour laquelle l'ARN est désaimantée de 50%, gain3, valeur du gain calculé, évolution, évolution de l'aimantation lors du bouclage en refroidissement rapide, T, température à laquelle a été réalisé le calcul du gain, ATR acquise, valeur de l'ATR acquise à la température T, lors de la détermination de l'archéointensité.

**tableau récapitulatif des valeurs d'Anisotropie d'Aimantation Thermorémanente**

Nech	K1R	K2R	K3R	K4R	K1R/ K4R	K2R/ K4R	K3R/ K4R	DK1R	IK1R	DK2R	IK2R	DK3R	IK3R	K1R/ K2R	K1R/ K3R	K2R/ K3R
31TAB1																
3B	1077	1010	0913	300	036	034	030	-142	353	-1089	65	152.1	539	1066	1180	1.106
8B	1.148	1001	0851	300	038	033	028	443	33.7	-78.7	393	159.7	327	1.147	1348	1.175
17B	1077	1003	0920	300	036	033	031	4.1	693	-348	-180	-1216	99	1075	1171	1.090
20B	1087	0975	0938	300	036	033	031	148	125	-886	461	1160	412	1.114	1.159	1.040
32B	1038	1023	0939	300	035	034	031	-129	366	-1143	149	1376	495	1015	1.105	1.089
72B	1051	0983	0966	300	035	033	032	-8.1	19.7	1068	496	68.1	-336	1069	1088	1.017
80B	1094	1037	0868	300	036	035	029	1034	-63	128	-50	648	819	1055	1260	1.194
81B	1092	0991	0917	300	036	033	031	1569	21.8	1012	-546	555	264	1.101	1.190	1.080
87B	1094	1028	0879	300	036	034	029	-88	156	-1033	155	124.1	67.7	1064	1245	1.170
92B	1091	1065	0845	300	036	035	028	890	98	7.7	-414	-11.7	469	1025	1291	1.260
31TAB3																
4B	1.134	1009	0857	300	038	034	029	919	-98	18	-1.1	856	80.1	1.123	1324	1.178
9B	1087	1060	0854	300	036	035	028	37.1	22	-532	84	1420	813	1025	1273	1.241
23B	1067	1009	0924	300	036	034	031	74	24	-816	-223	-883	676	1057	1.155	1.092
34B	1099	1026	0875	300	037	034	029	122	226	-75.7	-50	-1540	668	1071	1257	1.173
40B	1.115	0990	0896	300	037	033	030	160	62	-732	-78	-1123	800	1.126	1245	1.105
51B	1081	1019	0901	300	036	034	030	83.6	21.6	-73	22	-1029	683	1061	1200	1.131
55B	1.136	1019	0844	300	038	034	028	62.7	08	-273	1.1	-1719	886	1.115	1346	1.208
57B	1.125	1000	0876	300	037	033	029	-63.5	24	-1539	7.7	43.7	819	1.125	1284	1.142
61B	1095	1020	0885	300	037	034	030	82.5	-22	-7.7	-55	143	840	1074	1237	1.152
65B	1069	1039	0892	300	036	035	030	140	33	-75.7	-52	-1084	838	1029	1.199	1.165
67B	1078	1035	0887	300	036	035	030	59.2	13	-31.5	260	151.9	640	1041	1215	1.167
69B	1079	1031	0890	300	036	034	030	102.6	-23	128	63	1730	833	1046	1212	1.159
31HLP																
8B	1048	1001	0950	300	035	033	032	145.7	50	523	34.1	-1170	554	1047	1.103	1054
18B	1070	1042	0870	298	036	035	029	-328	-12.7	-1262	-14.7	-83.7	704	1027	1230	1.198
22B	1054	1039	0907	300	035	035	030	-458	55	-1355	-32	1645	83.7	1014	1.162	1.146
52B	1083	1016	0902	300	036	034	030	34.5	105	-594	204	150.1	668	1066	1201	1.126
59B	1043	1028	0930	300	035	034	031	127.7	-199	434	153	1683	645	1015	1.122	1.105
90B	1090	1072	0837	300	036	036	028	579	3.1	-323	4.1	-1750	849	1017	1302	1.281
92B	1065	1021	0914	300	036	034	030	-0.7	-54	-860	413	832	482	1043	1.165	1.117
95B	1064	1047	0889	300	035	035	030	45.5	28.7	-505	109	-1592	590	1016	1.197	1.178
31HLR2																
11B	1086	0990	0929	301	036	033	031	-659	133	-152.1	-158	1658	69.1	1097	1.169	1.066
26B	1065	1025	0910	300	036	034	030	72.6	69	-16.7	-54	-689	81.2	1039	1.170	1.126
37B	1.102	0980	0918	300	037	033	031	-162.5	82	105.7	12.1	-39.1	753	1.124	1200	1.068
40B	1064	1031	0905	300	035	034	030	-174	-123	-108.5	-50	-40.1	76.7	1032	1.176	1.139
55B	1089	1003	0908	300	036	033	030	33	26.7	-793	-143	-1440	592	1086	1.199	1.105
65B	1057	1014	0929	300	035	034	031	133.1	15	42.7	143	-1309	756	1042	1.138	1.091
78B	1063	0994	0943	300	035	033	031	164.7	320	71.8	4.7	-25.7	575	1069	1.127	1.054
79B	1088	1006	0906	300	036	034	030	43.1	25	-474	115	145.2	782	1081	1200	1.110
49127A																
62B	1.179	1.128	0693	300	039	038	023	-109	-49	-100.7	26	170	845	1046	1700	1.626
63B	1.120	1.103	0.777	300	037	037	026	1243	-32	344	15	1499	864	1015	1.441	1.419
64B	1.152	1.105	0.743	300	038	037	025	123	26	-774	-58	-102.1	83.7	1042	1.550	1.487
69B	1092	1005	0903	300	036	034	030	48	-6.7	-92.1	22.1	694	668	1086	1209	1.113
71B	1075	1038	0887	300	036	035	030	23.7	163	-63.1	-106	-121.4	704	1036	1213	1.171
72B	1.163	1042	0.795	300	039	035	027	69	128	-806	-109	-131.3	730	1.117	1463	1.310
73B	1084	1042	0874	300	036	035	029	1293	15	390	113	-1330	786	1041	1240	1.192
74B	1.103	1020	0877	300	037	034	029	-1332	170	1408	-128	860	685	1081	1258	1.164
75B	1.100	1092	0808	300	037	036	027	-69	-29	-968	18	243	866	1007	1362	1.352
77B	1082	1046	0873	297	036	034	029	-35.1	123	-125.4	18	1365	776	1034	1239	1.198
78B	1.105	1056	0840	300	037	035	028	-95	-25	-995	-0.1	-11.1	875	1046	1316	1.258
79B	1.179	1022	0.799	300	039	034	027	-1488	113	1198	70	-14	766	1.154	1476	1.279

Nach	K1R	K2R	K3R	K4R	K1R/ K4R	K2R/ K4R	K3R/ K4R	DK1R	IK1R	DK2R	IK2R	DK3R	IK3R	K1R/ K2R	K1R/ K3R	K2R/ K3R
22179A																
40T	1096	0978	0925	300	037	033	031	-675	17	-1570	-188	-1624	711	1.121	1.185	1.057
52T	1.113	1035	0852	300	037	034	028	-93	-76	-994	-09	-162	823	1.075	1.306	1.215
57T	1.156	1015	0828	300	039	034	028	-1375	26	1316	192	-402	707	1.139	1.396	1.226
63T	1.174	1099	0727	300	039	037	024	565	59	-342	62	-1703	814	1.068	1.616	1.513
77T	1.100	1052	0847	300	037	035	028	211	-82	-688	09	274	818	1.046	1.299	1.242
78T	1.117	1080	0803	300	037	036	027	198	-67	-701	08	267	832	1.034	1.391	1.345
92T	1.113	1005	0882	300	037	034	029	-1419	72	1277	26	181	823	1.107	1.262	1.139
106T	1.069	1032	0899	300	036	034	030	-244	-1.1	-1145	-6.1	-1038	838	1.036	1.189	1.148
112T	1.161	1062	0777	300	039	035	026	-443	93	-1324	-113	-1729	753	1.093	1.494	1.366
127T	1.159	0955	0887	300	039	032	030	1319	05	398	758	-1379	142	1.214	1.307	1.077
138T	1.071	1034	0895	300	036	034	030	-1337	137	1342	85	132	738	1.036	1.197	1.156
35127A																
32B	1.042	1.006	0952	300	035	034	032	-1279	18	142.1	-1.7	966	875	1.036	1.094	1.056
147B	1.038	1.009	0953	300	035	034	032	274	0.7	-622	-288	-638	612	1.028	1.088	1.059
159B	1.031	1.021	0949	300	034	034	032	266	-78	-648	-100	-259	773	1.010	1.086	1.076
209B	1.035	1.019	0947	300	034	034	032	684	1.7	-21.1	-143	-280	756	1.016	1.093	1.076
35288A																
68T	1.106	1.066	0828	300	037	036	028	-1609	119	1102	-5.1	431	770	1.038	1.336	1.287
93T	1.148	1.057	0795	300	038	035	027	53	-49	-845	29	362	843	1.086	1.443	1.329
135T	1.091	1.030	0880	300	036	034	029	-1525	60	1190	-139	948	748	1.059	1.240	1.171
161T	1.090	1.043	0867	300	036	035	029	469	42	-430	-1.7	-1110	855	1.045	1.258	1.204
169T	1.100	1.058	0842	300	037	035	028	1433	78	519	106	-91.1	768	1.040	1.307	1.256
176T	1.118	1.054	0829	300	037	035	028	513	40	-379	-103	-594	789	1.061	1.349	1.272
198T	1.121	1.055	0824	300	037	035	027	-1234	24	1468	-45	1182	849	1.063	1.361	1.280
211T	1.092	1.052	0856	300	036	035	029	404	5.7	-49.6	0.1	-147.7	842	1.038	1.276	1.229
53169A																
12T	1.099	1.022	0878	300	037	034	029	17	5.1	-89.1	85	1224	801	1.075	1.252	1.164
15T	1.075	1.041	0884	300	036	035	029	70	182	-77.7	-155	-1298	657	1.033	1.216	1.177
19T	1.102	1.061	0837	300	037	035	028	18.7	140	-70.2	-43	-1436	754	1.039	1.316	1.267
35T	1.094	1.009	0897	300	036	034	030	375	154	-509	-58	-1210	735	1.085	1.220	1.125
42T	1.075	1.042	0883	300	036	035	029	613	10.7	-29.7	53	-1457	780	1.031	1.216	1.179
49T	1.130	0953	0917	300	038	032	031	426	53	-48.6	13.1	1542	758	1.186	1.232	1.039
56T	1.110	1.025	0864	300	037	034	029	3.7	-8.1	-87.6	-89	-446	780	1.083	1.285	1.187
11S	1.084	1.058	0859	300	036	035	029	30.6	30	-59.2	-4.1	-95.4	849	1.024	1.261	1.231
16S	1.076	1.050	0874	300	036	035	029	-1760	15.1	908	118	-358	707	1.024	1.230	1.201
64T	1.080	1.020	0901	300	036	034	030	58	-03	-838	51.5	956	385	1.059	1.199	1.132
70LXF																
2P	1.102	1.007	0890	300	037	034	030	-583	95	-1390	-440	-1577	445	1.094	1.238	1.131
5P	1.091	1.022	0887	300	036	034	030	-1452	156	122.7	76	77	726	1.068	1.230	1.152
9P	1.150	1.006	0844	300	038	034	028	-1403	05	1296	189	-489	71.1	1.143	1.363	1.192
10P	1.103	1.056	0841	300	037	035	028	968	192	6.1	22	-90.1	70.7	1.045	1.312	1.256
12P	1.066	1.049	0884	300	036	035	029	-1060	14.7	1646	-24	838	75.1	1.016	1.206	1.187
13P	1.074	1.016	0910	300	036	034	030	603	105	-28.6	-6.1	-890	779	1.057	1.180	1.116
15P	1.151	0970	0879	300	038	032	029	28.1	152	-599	-73	-1250	73.1	1.187	1.309	1.104
19P	1.177	1.081	0742	300	039	036	025	42.1	233	-484	1.1	-1410	66.7	1.089	1.586	1.457
7225A																
11T	1.141	1.060	0799	300	038	035	027	-1493	36	1203	63	-30.1	827	1.076	1.428	1.327
12T	1.065	1.003	0932	300	036	033	031	154	0.7	-746	06	1552	89.1	1.062	1.143	1.076
31T	1.080	1.018	0902	300	036	034	030	24.1	93	-658	-09	-1503	80.7	1.061	1.197	1.129
44T	1.061	1.021	0971	305	035	033	032	68.7	136	-213	00	-1114	764	1.039	1.093	1.051
50T	1.084	1.024	0892	300	036	034	030	61.1	35	-28.1	-135	-432	76.1	1.059	1.215	1.148
88T	1.079	1.063	0859	300	036	035	029	-143	-3.1	-1042	3.1	304	856	1.015	1.256	1.237
91T	1.062	1.018	0920	300	035	034	031	49.1	53	-396	-140	-612	750	1.043	1.154	1.107
128T	1.073	1.029	0899	300	036	034	030	-1215	15.1	1478	28	475	746	1.043	1.194	1.145

Nech	K1R	K2R	K3R	K4R	K1R/ K4R	K2R/ K4R	K3R/ K4R	DK1R	IK1R	DK2R	IK2R	DK3R	IK3R	K1R/ K2R	K1R/ K3R	K2R/ K3R
11sal-A7																
15A	1082	1019	0898	300	036	034	030	-1302	132	1435	-152	1006	697	1062	1205	1134
16A	1108	1001	0891	300	037	033	030	-1212	50	1485	38	211	837	1107	1243	1123
24A	1057	1023	0920	300	035	034	031	82	-74	-826	-56	-294	807	1033	1148	1112
25A	1116	1050	0834	300	037	035	028	-331	54	-1224	-76	-1579	807	1063	1338	1259
26A																
30A	1107	1079	0814	300	037	036	027	-1177	69	1534	-92	1158	785	1027	1360	1325
33A	1105	1055	0840	300	037	035	028	-1417	112	1288	-27	519	785	1047	1314	1255
37A	1007	1004	0989	300	034	033	033	-424	-306	-1327	-06	-437	594	1002	1017	1015
42A	1140	1063	0798	300	038	035	027	-1173	223	1475	126	301	641	1072	1428	1332
48A	1135	1080	0785	300	038	036	026	136	-53	-764	05	196	847	1051	1447	1377
49A	1123	0993	0884	300	037	033	029	-186	92	-1090	26	1453	804	1130	1270	1124
51A	1129	1022	0849	300	038	034	028	-1134	72	1577	-93	1195	782	1104	1329	1204
11salB																
1P	1173	1033	0794	300	039	034	026	123	177	-920	378	1222	469	1136	1477	1301
2P	1118	1000	0882	300	037	033	029	-487	174	-1332	-170	1784	653	1118	1268	1134
3P	1166	1135	0699	300	036	038	022	43	20	-857	10	1585	877	1027	1668	1624
4P	1165	1027	0808	300	039	034	027	-632	187	-1514	-53	1338	705	1134	1442	1271
5P	1154	1083	0764	300	038	036	025	-1322	95	1411	-190	1124	686	1066	1511	1418
6P	1137	1102	0760	300	038	037	025	-357	174	-1140	-329	-1491	517	1032	1496	1450
7P	1161	1083	0755	300	039	036	025	62	26	-840	48	1245	846	1072	1538	1434
8P	1201	0929	0870	300	040	031	029	420	33	-471	-153	-599	743	1293	1380	1068
8PA	1133	1042	0824	300	038	035	027	-1318	20	1387	-133	1300	765	1087	1375	1265
9P	1174	0959	0868	300	039	032	029	-381	269	-1452	300	857	476	1224	1353	1105
10P	1107	1076	0817	300	037	036	027	48	-15	-846	186	904	714	1029	1355	1317
11P	1122	1070	0808	300	037	036	027	-1422	60	1281	-30	644	833	1049	1389	1324
11sal7																
1P0	1090	1068	0842	300	036	036	028	-383	198	-1236	-127	1771	662	1021	1295	1269
1P1	1015	0993	0992	300	034	033	033	-1021	809	121	37	-779	00	1021	1023	1002
2P0	1121	1059	0820	300	037	035	027	43	-99	-828	158	633	712	1059	1366	1290
2P1	1033	1012	0955	300	034	034	032	626	-34	-285	-177	-167	720	1021	1081	1059
3P2	1036	1008	0956	300	035	034	032	-1546	45	1117	393	-591	503	1028	1084	1054
5P0	1077	1025	0898	300	036	034	030	48	-44	-849	43	491	838	1051	1199	1141
6P3	1142	1081	0777	300	038	036	026	-336	166	-1245	29	1360	731	1056	1471	1392
6P4	1161	1062	0778	300	039	035	026	-254	128	-1149	-23	1652	770	1093	1492	1365
6P5	1136	1084	0780	300	038	036	026	114	61	-802	151	1229	737	1048	1456	1390
7P1	1076	1026	0899	300	036	034	030	-1331	72	1364	40	174	817	1048	1197	1141
7P2	1052	1025	0923	300	035	034	031	-434	149	-1310	-89	1689	725	1027	1139	1110
8P0	1198	1119	0821	314	038	036	026	1117	15	216	32	-1328	865	1071	1459	1363
8P2	1180	0999	0936	312	038	032	030	1135	57	224	102	-1275	783	1181	1261	1067
8P3	1190	1151	0659	300	040	038	022	261	26	-641	39	1497	853	1034	1806	1747
8P4	1196	1166	0637	300	040	039	021	-526	152	-1452	95	939	719	1026	1878	1830
9P0	1145	1077	0779	300	038	036	026	-678	34	-1594	252	294	646	1063	1469	1382
9P1	1051	0990	0959	300	035	033	032	-952	480	-1699	-134	1112	388	1062	1097	1033
10P1	1174	1097	0730	300	039	037	024	-291	120	-1200	44	1303	772	1070	1608	1503
12P0	1057	1007	0682	275	038	037	025	349	24	-549	-48	-814	847	1050	1550	1477
12P1	1061	1004	0934	300	035	033	031	-1174	38	1537	-161	1398	734	1057	1136	1075
14P0	1042	1020	0939	300	035	034	031	-819	537	-1748	21	937	362	1022	1110	1086
14P1	1067	1005	0928	300	036	034	031	-1337	706	-1695	-160	1036	108	1062	1150	1083
15P0	1102	1067	0831	300	037	036	028	361	110	-484	-260	-748	615	1033	1327	1284



Nech	K1R	K2R	K3R	K4R	K1R/ K4R	K2R/ K4R	K3R/ K4R	DK1R	IK1R	DK2R	IK2R	DK3R	IK3R	K1R/ K2R	K1R/ K3R	K2R/ K3R
11sal18																
1P2	1084	1007	0909	300	036	034	030	265	121	-626	-41	-1340	772	1077	1193	1108
1P3	1054	1028	0918	300	035	034	031	42	03	-858	-08	-1075	891	1025	1147	1119
2P2	1121	1079	0800	300	037	036	027	00	73	-914	105	1244	772	1038	1401	1350
3P1A	1091	0990	0918	300	036	033	031	-1152	166	1483	208	104	629	1102	1189	1079
3P1B	1063	1005	0932	300	035	034	031	112	-15	-790	-96	-698	803	1058	1141	1079
4P1	1058	1011	0930	300	035	034	031	-201	25	-1105	92	851	804	1046	1138	1087
5P1	1056	1012	0932	300	035	034	031	259	142	-570	-262	-897	597	1043	1133	1086
10P1	1144	1095	0761	300	038	037	025	222	110	-691	65	1707	771	1044	1504	1440
10P2	1044	1013	0943	300	035	034	031	1455	196	480	202	-840	612	1031	1107	1073
13P1	1062	0975	0963	300	035	033	032	-507	105	-1420	66	963	775	1089	1103	1013
13P2	1053	1039	0908	300	035	035	030	1161	261	436	-315	-54	469	1014	1160	1144
18P2	1045	0999	0955	300	035	033	032	-85	18	861	687	808	-213	1046	1094	1046
11sal19																
3P	1082	1037	0881	300	036	035	029	463	127	-435	-10	-1290	773	1043	1228	1177
5P	1119	1065	0816	300	037	036	027	-351	304	-1206	-76	1619	585	1051	1372	1306
6P	1051	1019	0930	300	035	034	031	-171	123	-1108	165	1079	692	1031	1130	1096
7P	1055	1009	0936	300	035	034	031	-53	249	-1035	170	1357	591	1046	1128	1078
8P	1066	1049	0885	300	036	035	029	-249	140	-1146	-10	1594	760	1016	1204	1186
10P	1077	0980	0943	300	036	033	031	-177	-61	-1076	09	-96	838	1098	1141	1039
12P	1077	1033	0891	300	036	034	030	232	-46	-671	-41	-184	839	1043	1209	1159
15P	1110	1054	0836	300	037	035	028	761	134	-180	169	-1574	681	1053	1328	1261
16P	1135	1108	0757	300	038	037	025	525	04	-374	42	-423	858	1024	1500	1465
18Pa	1107	1069	0824	300	037	036	027	-197	-103	-1122	-134	-732	729	1036	1345	1298
18Pb	1133	1024	0843	300	038	034	028	85	51	-781	-337	-890	558	1107	1345	1215
20P	1039	1025	0936	300	035	034	031	-26	-08	-927	-69	-860	831	1015	1111	1095
11sal10																
1P1	1068	1016	0916	300	036	034	031	375	214	-681	344	1531	477	1051	1165	1109
1P4	1041	1000	0959	300	035	033	032	1061	347	371	-275	-239	429	1041	1085	1043
2P0	1080	1043	0877	300	036	035	029	-622	138	-1534	46	985	754	1035	1231	1190
2P1	1112	0965	0923	300	037	032	031	-331	260	-1407	317	882	468	1153	1205	1045
3P4	1093	1019	0888	300	036	034	030	385	265	-794	433	1491	352	1073	1230	1147
3P6	1045	0996	0959	300	035	033	032	-92	35	-980	-185	-1096	712	1048	1089	1039
9P0	1148	1017	0835	300	038	034	028	1302	36	402	00	-498	864	1129	1374	1217
9P1	1117	1052	0831	300	037	035	028	365	26	-530	-117	-660	780	1061	1343	1265
10P1	1056	0992	0952	300	035	033	032	1274	243	569	-365	118	437	1064	1109	1042
10P2	1061	1037	0902	300	035	035	030	-431	87	-1312	-121	-1681	750	1023	1177	1150
12P0	1089	1019	0893	300	036	034	030	349	41	-534	-233	-645	663	1069	1219	1141
12P3	1077	1031	0892	300	036	034	030	45	137	-814	-162	-1237	685	1045	1208	1155
11sal12																
2P	1112	1000	0888	300	037	033	030	211	54	-696	78	1455	805	1111	1252	1127
3P	1086	1032	0882	300	036	034	029	21	128	-871	-33	-1628	767	1052	1231	1171
5P	1058	1022	0920	300	035	034	031	-430	173	-1316	-44	1524	722	1035	1149	1110
9P	1088	1030	0882	300	036	034	029	-206	139	-1117	45	1409	754	1056	1233	1167
10P	1130	1104	0766	300	038	037	026	-1091	360	1589	28	651	538	1024	1476	1441
11P	1085	1071	0845	300	036	036	028	1227	186	325	07	-594	714	1013	1284	1267
12P	1092	1017	0891	300	036	034	030	244	01	-656	32	1153	868	1074	1226	1141
13P	1116	1043	0841	300	037	035	028	1141	96	206	201	-1316	675	1070	1327	1240
14P	1157	1074	0770	300	039	036	026	921	-73	35	111	1494	767	1078	1503	1395
15P	1140	0982	0877	300	038	033	029	-624	163	-1418	-323	-1752	529	1161	1300	1120
15P	1096	1031	0873	300	037	034	029	1053	-40	148	-77	426	813	1063	1256	1182
18P	1181	0999	0820	300	039	033	027	-1212	189	1523	-100	889	685	1181	1440	1219

Nech	K1R	K2R	K3R	KtR	K1R/ KtR	K2R/ KtR	K3R/ KtR	DK1R	IK1R	DK2R	IK2R	DK3R	IK3R	K1R/ K2R	K1R/ K3R	K2R/ K3R
11salf3																
3T1	1.156	0966	0877	300	039	032	029	1086	15	187	-55	38	843	1.197	1318	1.101
3T2	1.105	1066	0828	300	037	036	028	-1170	126	152.1	42	439	76.7	1037	1335	1.287
6T1	1.149	1041	0811	300	038	035	027	-792	16.1	178.5	366	30.1	489	1.104	1417	1.284
6T2	1.102	1044	0854	300	037	035	028	-1119	84	157.7	27	498	81.1	1056	1290	1.222
12T1	1.186	1043	0771	300	040	035	026	-1246	22	146.4	-23.2	140.2	66.7	1.137	1538	1.353
12T2	1.207	1052	0741	300	040	035	025	228	12.1	-56.5	-409	-80.3	46.6	1.147	1629	1.420
13T1	1.145	1066	0788	300	038	036	026	-119.7	20	150.9	-15.7	143.4	74.2	1.074	1453	1.353
13T2	1.029	1005	0966	300	034	033	032	-123	33	-98.5	-48.3	-105.2	41.5	1.024	1065	1.040
14T1	1.154	1042	0805	300	038	035	027	-340	53.9	171.8	33.3	73.5	12.4	1.107	1434	1.294
14T2	1.175	1.147	0678	300	039	038	023	162	20.1	-74.4	16	-168.7	69.8	1.024	1.733	1.692
14T3	1.104	1087	0809	300	037	036	027	-139.9	12.5	130.3	-0.7	43.6	77.4	1.016	1.365	1.344
11salf4																
1P1	1.127	1060	0812	300	038	035	027	61.7	150	306	85	-149.1	72.6	1.063	1.388	1.305
1P2	1.082	1041	0877	300	036	035	029	-58.3	11.6	-145.1	-14.9	175.1	71.0	1.040	1.233	1.186
2P1	1.130	0988	0882	300	038	033	029	1740	12.7	81.5	11.0	-48.3	73.1	1.145	1.282	1.120
2P2	1.141	0938	0921	300	038	031	031	145.1	30	56.4	-24.4	48.5	65.4	1.216	1.239	1.019
3P1A	1.180	1.142	0678	300	039	038	023	136.2	9.5	46.5	-2.0	-31.6	80.3	1.033	1.741	1.686
3P1B	1.245	1072	0683	300	041	036	023	-106.2	2.3	163.7	20	32.3	87.0	1.161	1.822	1.569
4P1	1.090	1006	0904	300	036	034	030	-25.2	18.6	-70.3	-64.5	-121.1	16.8	1.084	1.206	1.113
4P3	1.088	0986	0926	300	036	033	031	53.2	130	-28.7	-31.3	-56.5	55.5	1.103	1.175	1.065
9P1B	faux															
9P2	1.170	1047	0784	300	039	035	026	131.5	27.0	-6.3	55.5	-127.9	19.8	1.118	1.493	1.336
17P1C	1.138	1096	0766	300	038	037	026	27.1	-1.3	-62.8	22	86.6	87.4	1.038	1.485	1.431
17P2	1.142	1064	0794	300	038	035	026	69.4	-2.9	-20.9	-5.1	8.9	84.2	1.073	1.438	1.340
11salf5																
1P	1.109	1041	0851	300	037	035	028	70.3	-9.4	-24.6	-27.3	-2.5	60.9	1.065	1.303	1.223
3P	1.048	1036	0916	300	035	035	031	27.6	7.8	-61.0	-9.5	-101.1	77.7	1.012	1.145	1.131
4P	1.161	1.125	0714	300	039	038	024	-140.6	0.8	129.5	-8.3	123.7	81.6	1.032	1.626	1.576
6P	1.042	1020	0938	300	035	034	031	26.2	23.3	-65.5	40	-164.6	66.3	1.021	1.110	1.087
10P	1.144	1.137	0719	300	038	038	024	-86.6	-1.3	-176.7	-3.5	-156.0	86.3	1.006	1.591	1.581
11P	1.153	1041	0805	300	038	035	027	50.0	16.5	-41.5	5.2	-148.6	72.6	1.107	1.432	1.293
12P	1.090	1021	0889	300	036	034	030	52.8	2.5	-38.6	28.9	147.4	60.9	1.068	1.226	1.149
15P	1.125	0995	0880	300	037	033	029	42.6	20.4	-59.8	29.8	161.7	52.6	1.131	1.278	1.131
17P	1.118	1085	0797	300	037	036	027	11.6	1.6	-78.6	7.3	114.0	82.6	1.030	1.403	1.361
18P	1.166	1.102	0731	300	039	037	024	-148.9	11.6	115.6	25.0	-36.0	62.1	1.058	1.595	1.508
19P	1.087	1010	0903	300	036	034	030	44.0	49.9	-80.6	25.5	174.3	28.5	1.076	1.204	1.118
20P	1.127	1064	0809	300	038	035	027	-130.2	3.2	140.5	-11.4	124.2	78.2	1.059	1.393	1.315

caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'ATR : N ech, échantillon, K1 R, K2 R, K3 R, valeurs propres maximales, intermédiaires et minimales, Kt R, somme des valeurs propres, K1R/Kt R, K2R/Kt R, K3R/Kt R, valeurs propres normalisées (prj dans le texte), D K1R, I K1R, D K2R, I K2R, D K3R, I K3R, déclinaisons et inclinaisons des vecteurs propres, K1R/K2R, K1R/K3R, K2R/K3R, rapports de linéation, degré d'anisotropie et foliation magnétique.

**tableau récapitulatif des valeurs d'Anisotropie d'Aimantation Magnétique de Susceptibilité**

N ech	K1S	K2S	K3S	K4S	K1S/ K4S	K2S/ K4S	K3S/ K4S	DK1S	IK1S	DK2S	IK2S	DK3S	IK3S	K1S/ K2S	K1S/ K3S	K2S/ K3S
31TAB1																
3B	7754	7442	7036	22232	0349	0335	0317	3402	419	672	-34	1535	478	1042	1.102	1.058
8B	18895	17826	15878	52599	0359	0339	0302	450	318	2844	393	1603	344	1060	1.190	1.123
17B	2829	2812	2752	8393	0337	0335	0328	1122	785	3217	99	508	-56	1006	1.028	1.022
20B	2167	2100	2064	6330	0342	0332	0326	3587	197	723	-380	1100	453	1032	1.050	1.017
28B	déruit															
32B	1376	1370	1342	4088	0336	0335	0328	2802	296	107	103	1184	588	1004	1.025	1.021
72B	2366	2324	2315	7004	0338	0332	0331	3433	246	1341	622	675	-123	1018	1.022	1.004
80B	548.1	532.6	4709	1551.6	0353	0343	0303	919	-93	06	-82	498	775	1029	1.164	1.131
81B	1712	1648	1618	4978	0344	0331	0325	3477	-201	886	-273	462	550	1039	1.058	1.018
87B	3999	3834	3489	11322	0353	0339	0308	3565	146	849	-62	1526	740	1043	1.146	1.099
92B	3450	3385	2961	9797	0352	0346	0302	790	55	1729	346	3410	547	1019	1.165	1.143
31TAB3																
4B	5582	5530	5328	16440	0340	0336	0324	2899	142	193	-21	1011	755	1009	1.048	1.038
9B	5370	5317	4661	15348	0350	0346	0304	397	-61	3107	92	970	789	1010	1.152	1.141
23B	210.1	2006	1922	6029	0349	0333	0319	35	-15	932	143	2793	755	1048	1.093	1.043
34B	1081.6	1044.3	961.7	3087.6	0350	0338	0312	46	206	982	93	2112	671	1036	1.125	1.086
40B	5165	487.1	449.6	14532	0355	0335	0309	115	101	1036	114	2408	745	1060	1.149	1.083
51B	2362	2348	2260	6970	0339	0337	0324	279.1	-177	93	01	278.7	723	1006	1.045	1.039
55B	2283	2210	2054	6547	0349	0338	0314	537	109	3233	22	2218	787	1033	1.111	1.076
57B	1726	1680	1596	5002	0345	0336	0319	1026	-53	124	-31	725	839	1028	1.082	1.052
61B	3835	3821	3729	11385	0337	0336	0328	683	15	3384	-67	325.1	831	1004	1.028	1.025
65B	11740	11433	10608	3378.1	0347	0338	0314	346.1	-30	754	137	2682	759	1027	1.107	1.078
67B	579	575	531	1685	0344	0341	0315	569	63	1439	-254	1600	637	1007	1.090	1.083
69B	5203	4975	473.1	1491.0	0349	0334	0317	1027	76	103	173	2156	708	1046	1.100	1.051
31HL-P																
8B	698	686	667	2052	0340	0334	0325	353	368	3140	-115	2384	508	1018	1.047	1.029
18B	4950	4852	4264	14066	0352	0345	0303	82	-24	973	206	2843	691	1020	1.161	1.138
22B	744	734	708	2187	0340	0336	0324	401	122	3080	99	1799	740	1013	1.051	1.037
52B	950	936	903	2790	0341	0336	0324	39	98	936	-20	1722	799	1015	1.052	1.036
59B	958	955	914	2827	0339	0338	0323	308.6	154	433	158	1767	675	1003	1.048	1.045
90B	5155	4874	4387	1441.6	0358	0338	0304	301.1	70	319	60	1621	807	1058	1.175	1.111
92B	604	598	582	1784	0338	0335	0326	133	-61	2898	471	977	421	1010	1.037	1.026
95B	1118	1107	1037	326.1	0343	0339	0318	236	304	2954	-30	2104	593	1010	1.079	1.068
31HL-R2																
11B	941	922	888	2751	0342	0335	0323	1062	-125	181	81	1405	750	1021	1.060	1.038
26B	803	799	775	2378	0338	0336	0326	2854	-29	150	04	2753	871	1005	1.037	1.032
37B	705	690	668	2063	0342	0334	0324	65	-103	973	-44	301	787	1022	1.055	1.033
40B	304.1	2972	2790	8803	0345	0338	0317	3225	43	530	-68	205	819	1023	1.090	1.065
55B	865	847	832	2544	0340	0333	0327	3469	130	785	69	1959	751	1021	1.039	1.017
65B	872	855	831	2558	0341	0334	0325	1322	-14	424	81	2127	817	1020	1.049	1.028
78B	978	960	947	2885	0339	0333	0328	61	-253	963	-04	70	646	1019	1.033	1.013
79B	2532	2514	2421	7467	0339	0337	0324	427	39	3120	98	1542	794	1007	1.046	1.038
49127A																
62B	2227	2211	1772	6211	0359	0356	0285	46	-36	2748	10	211	862	1007	1.257	1.248
63B	6163	6121	5643	17928	0344	0341	0315	3063	10	364	28	1957	869	1007	1.092	1.085
64B	1258.8	12492	11377	3645.6	0345	0343	0312	3176	-45	472	52	2674	831	1008	1.107	1.098
69B	4145	3947	3560	11652	0356	0339	0306	3426	152	685	-148	1164	684	1050	1.164	1.109
71B	8376	8340	7946	24662	0340	0338	0322	145	172	2876	-99	2261	700	1004	1.054	1.049
72B	nm															
73B	3140	3068	2700	8908	0352	0344	0303	3332	78	652	143	2155	735	1023	1.163	1.136
74B	2047	2031	1899	5977	0343	0340	0318	273	-145	3028	200	840	648	1008	1.078	1.069
75B	3400	3366	3219	9985	0340	0337	0322	3331	-22	629	54	2643	841	1010	1.056	1.046
77B	4650	4600	4158	13408	0347	0343	0310	3326	93	638	74	1917	780	1011	1.118	1.106
78B	4350	4294	3955	12599	0345	0341	0314	3480	-15	779	55	2724	842	1013	1.100	1.086
79B	6348	6271	5743	18362	0346	0342	0313	17	-95	2717	-25	3472	802	1012	1.105	1.092

N ech	K1S	K2S	K3S	K4S	K1S/ K4S	K2S/ K4S	K3S/ K4S	DK1S	IK1S	DK2S	IK2S	DK3S	IK3S	K1S/ K2S	K1S/ K3S	K2S/ K3S
22179A																
40T	2540	2255	2131	6926	0367	0326	0308	1064	16	162	64	2105	833	1.126	1.192	1.059
52T	3653	3566	3257	10476	0349	0340	0311	3494	-35	795	-16	133	862	1024	1.122	1.095
57T	2732	2700	2535	7967	0343	0339	0318	421	03	3122	-144	3109	756	1012	1.078	1.065
63T	3650	3517	2951	10118	0361	0348	0292	471	88	3158	80	1840	780	1038	1.237	1.192
77T	2425	2387	2136	6948	0349	0343	0308	3560	-45	862	-22	221	850	1016	1.135	1.117
78T	3099	3030	2587	8715	0356	0348	0297	3515	-24	815	-11	148	874	1023	1.198	1.171
92T	4719	4598	4284	13601	0347	0338	0315	87	-57	993	-62	562	816	1026	1.102	1.073
106T	1715	1685	1590	4991	0344	0338	0319	3390	-07	690	28	2626	871	1018	1.079	1.059
112T	2721	2604	2230	7555	0360	0345	0295	3145	45	455	126	2052	764	1045	1.221	1.168
127T	3910	3742	3626	11278	0347	0332	0322	1015	-50	131	182	1769	710	1045	1.078	1.032
138T	1917	1900	1822	5639	0340	0337	0323	319	-82	3004	-100	3404	771	1009	1.052	1.043
35127A																
32B	6329	6299	5949	18576	0341	0339	0320	3422	02	719	-92	737	808	1005	1.064	1.059
147B	12019	11804	11254	35077	0343	0336	0321	270	25	1187	331	2930	567	1018	1.068	1.049
159B	21550	21190	19740	62480	0345	0339	0316	3326	-51	632	-62	237	820	1017	1.092	1.074
209B	3474	3367	3249	10090	0344	0334	0322	1280	34	379	15	2836	862	1032	1.069	1.036
35288A																
68T	4311	4270	3925	12506	0345	0342	0314	3407	-55	717	-108	441	779	1010	1.098	1.088
93T	3585	3507	3262	10354	0346	0339	0315	3549	-74	850	-13	43	825	1022	1.099	1.075
135T	2787	2778	2506	8071	0345	0344	0310	181	-37	2893	173	966	721	1003	1.112	1.109
161T	7301	7272	6829	21402	0341	0340	0319	3485	91	790	55	1999	793	1004	1.069	1.065
169T	4186	4099	3843	12128	0345	0338	0317	3241	49	549	89	2056	797	1021	1.089	1.067
176T	5616	5602	5151	16369	0343	0342	0315	214	-45	2907	-135	3093	758	1003	1.090	1.088
198T	7608	7523	6865	21996	0346	0342	0312	591	-23	3292	28	1114	863	1011	1.108	1.096
211T	15234	15121	13280	43635	0349	0347	0304	389	86	3085	30	1995	808	1007	1.147	1.139
53169A																
12T	1683	1679	1623	4985	0338	0337	0326	3219	45	515	-69	855	817	1003	1.037	1.034
15T	3896	3826	3541	11264	0346	0340	0314	1280	127	380	03	3064	772	1018	1.100	1.081
19T	1776	1770	1588	5134	0346	0345	0309	3252	63	564	120	2081	763	1004	1.119	1.115
35T	12803	12692	11300	36795	0348	0345	0307	516	111	3213	18	2219	787	1009	1.133	1.123
42T	3818	3741	3521	11080	0345	0338	0318	627	99	3319	42	2193	791	1020	1.084	1.063
49T	9256	8535	8362	26153	0354	0326	0320	447	04	1347	48	3091	850	1084	1.107	1.021
56T	nm															
11S	3510	3453	3144	10107	0347	0342	0311	1309	21	405	105	2323	791	1016	1.116	1.098
16S	3763	3593	3345	10702	0352	0336	0313							1047	1.125	1.074
64T	3955	3899	3635	11489	0344	0339	0316	3539	31	838	-35	1259	853	1014	1.088	1.073
70LUX-F																
2P	5928	5864	5362	17154	0346	0342	0313	517	259	1357	-122	2029	609	1011	1.106	1.094
5P	2008	1987	1844	5839	0344	0340	0316	795	-08	3494	-101	3535	798	1011	1.089	1.078
9P	3762	3698	3428	10888	0345	0340	0315	514	14	3217	-107	3139	792	1017	1.098	1.079
10P	3639	3570	3050	10259	0355	0348	0297	1006	164	82	80	2531	716	1020	1.193	1.170
12P	2175.1	21549	18793	62094	0350	0347	0303	2946	127	210	-156	623	696	1009	1.157	1.147
13P	28850	28350	25130	82330	0350	0344	0305	888	157	3597	-31	2805	739	1018	1.148	1.128
15P	4743	4604	4373	13720	0346	0336	0319	94	69	993	-05	1853	830	1030	1.085	1.053
19P	10637	10147	7610	28394	0375	0357	0268	391	208	3086	13	2151	690	1048	1.398	1.333
72225A																
11T	9002	8935	8249	26186	0344	0341	0315	271	-32	2971	-12	66	866	1007	1.091	1.083
12T	16852	16600	15874	49326	0342	0336	0322	363	59	3052	102	1559	780	1015	1.062	1.046
31T	8010	7867	7545	23422	0342	0336	0322	149	119	1051	10	2000	779	1018	1.062	1.043
44T	22494	22338	21556	66388	0339	0336	0325	708	35	3415	-109	3231	785	1007	1.043	1.036
50T	24942	24611	23690	73243	0340	0336	0323	697	25	3401	-97	3249	799	1013	1.053	1.039
88T	11879	11739	11292	34910	0340	0336	0324	01	-49	903	-23	251	846	1012	1.052	1.040
91T	13821	13691	13141	40653	0340	0337	0323	142	-64	2839	-26	3522	831	1010	1.052	1.042
128T	26255	26124	25026	77405	0339	0338	0323	2925	52	211	-129	442	760	1005	1.049	1.044

N ech	K1S	K2S	K3S	K4S	K1S/ K4S	K2S/ K4S	K3S/ K4S	DK1S	IK1S	DK2S	IK2S	DK3S	IK3S	K1S/ K2S	K1S/ K3S	K2S/ K3S
11SAL-A7																
15A	8934	8590	7610	25134	0356	0342	0303	1330	15	2233	112	352	785	1040	1174	1129
16A	11560	11090	10000	32650	0354	0340	0306	660	28	3361	-31	2927	858	1042	1156	1109
24A	6976	6878	6087	19941	0350	0345	0305	232	16	1133	47	2742	85	1014	1146	1130
25A	10072	9850	7864	27786	0363	0354	0283	1137	27	232	102	2187	794	1023	1281	1253
30A	12990	12800	10310	36100	0360	0355	0286	545	-10	3247	104	1391	794	1015	1260	1242
33A	12460	12400	10820	35680	0349	0347	0303	3119	47	415	-44	887	835	1005	1152	1146
37A	9980	9870	7620	27470	0363	0359	0277	392	-71	3095	24	582	825	1011	1310	1295
42A	11090	10970	8690	30750	0361	0357	0283	690	-11.1	3381	-5.1	440	778	1011	1276	1262
48A	11560	11330	9680	32570	0355	0348	0297	251	-1.1	1151	24	3187	872	1020	1194	1171
49A	12490	11950	10950	35390	0353	0338	0309	3532	85	849	116	2277	754	1045	1141	1091
51A	15670	14510	12440	42620	0368	0340	0292	669	19	3365	119	1662	779	1080	1260	1166
11salf3																
1B	4000	3890	2950	10840	0369	0359	0272	3590	233	778	-240	1277	554	1028	1356	1319
2B	755	740	697	2192	0344	0338	0318	1207	-160	353	156	1674	673	1020	1083	1062
3B	10310	10220	7649	28179	0366	0363	0271	914	-03	15	32	1768	867	1009	1348	1336
4B	5009	4503	3558	13070	0383	0345	0272	2928	179	242	44	1276	714	1112	1408	1266
5B	1413	1403	1325	4141	0341	0339	0320	645	-14.1	3382	138	1109	700	1007	1066	1059
6B	1202	1185	1115	3502	0343	0338	0318	1129	28	209	352	2070	545	1014	1078	1063
7B	7619	7534	6936	22089	0345	0341	0314	01	55	899	-23	1578	839	1011	1099	1086
8B	2922	2825	2768	8515	0343	0332	0325	379	61	1296	155	287.1	732	1034	1056	1021
8BA	2864	2770	2683	8317	0344	0333	0323	472	27	3166	123	1495	772	1034	1067	1032
9B	4100	3506	3300	10906	0376	0322	0303	3099	203	414	39	1418	692	1169	1242	1062
10B	3040	2910	2330	8280	0367	0351	0281	166	-35	2876	153	943	742	1045	1305	1249
11B	5444	5400	4260	15104	0360	0357	0282	641	-26	3342	23	1067	865	1008	1278	1268
11salf7																
1P0	10090	10020	9190	29300	0344	0342	0314	129	235	2824	12	1895	664	1007	1098	1090
1P1	9550	9470	8360	27380	0349	0346	0305	166	18	2858	236	1108	662	1008	1142	1133
2P0	14750	14270	13330	42350	0348	0337	0315	3555	-22	861	-139	769	759	1034	1107	1071
2P1	4166	4161	3880	12207	0341	0341	0318	553	00	3253	-145	3253	755	1001	1074	1072
3P2	4507	4429	4332	13268	0340	0334	0326	370	66	1299	233	292.1	655	1018	1040	1022
5P0	688	680	671	2039	0337	0333	0329	3559	-3.1	862	-66	609	82.7	1012	1025	1013
6P3	168.7	1649	1448	4784	0353	0345	0303	3382	134	664	-74	1284	745	1023	1165	1139
6P4	2005	1958	1795	5758	0348	0340	0312	3480	196	768	-35	1572	700	1024	1117	1091
6P5	2026	1988	1776	5790	0350	0343	0307	3447	114	727	-94	1232	749	1019	1141	1119
7P1	2498	2478	2373	7349	0340	0337	0323	341.1	-145	694	63	3163	74.1	1008	1053	1044
7P2	2259	2224	2144	6627	0341	0336	0324	3284	110	573	-57	1207	775	1016	1054	1037
8P0	5799	5727	5054	16580	0350	0345	0305	786	42	3484	23	2295	850	1013	1147	1133
8P2	4660	4525	4265	13450	0347	0336	0317	95.1	42	45	79	2130	809	1030	1093	1061
8P3	6337	6251	5553	18141	0349	0345	0306	146	35	1045	-16	1704	861	1014	1141	1126
8P4	4779	4750	4184	13713	0349	0346	0305	333.7	95	613	-14.1	969	728	1006	1142	1135
9P0	6212	5935	4988	17135	0363	0346	0291	879	-54	1763	175	144	716	1047	1245	1190
9P1	4200	4110	4070	12380	0339	0332	0329	2223	244	3192	147	774	608	1022	1032	1010
10P1	6810	6697	5742	19249	0354	0348	0298	3380	12.1	673	-34	1423	773	1017	1186	1166
12P0	4030	3945	3780	11755	0343	0336	0322	3496	-9.1	788	47	3214	79.7	1021	1066	1044
12P1	4355	431.1	4130	12796	0340	0337	0323	2802	11.5	98	-17	920	783	1010	1054	1044
14P0	2379	2377	2327	7083	0336	0336	0329	1940	00	1040	-55.7	1040	343	1001	1022	1021
14P1	2407	2394	2355	7156	0336	0335	0329	409	-744	63	12.1	982	86	1005	1022	1017
15P0	14278	14134	11256	39668	0360	0356	0284	473	78	3196	-159	2917	722	1010	1268	1256

N ech	K1S	K2S	K3S	K4S	K1S/ K1S	K2S/ K1S	K3S/ K1S	DK1S	IK1S	DK2S	IK2S	DK3S	IK3S	K1S/ K2S	K1S/ K3S	K2S/ K3S
11salf8																
1P2	8060	7940	7270	23270	0346	0341	0312	269	146	2969	-02	2075	753	1015	1109	1092
1P3	8600	8539	7711	24850	0346	0344	0310	3374	-108	674	-05	3398	792	1007	1115	1107
2P2	3817	3743	2825	10385	0368	0360	0272	90	95	977	-74	1508	779	1020	1351	1325
3P1A	6047	6034	5994	18075	0334	0333	0332	3220	-126	518	-12	3268	774	1002	1008	1006
3P1B	6150	6130	6090	18370	0335	0334	0331	3424	133	576	-206	2731	-627	1003	1010	1007
4P1	6595	6569	6403	19567	0337	0336	0327	3579	-11	888	-52	767	846	1004	1030	1026
5P1	7890	7850	7640	23380	0338	0336	0327	159	38	2874	-188	2746	708	1005	1033	1028
10P1	6932	6739	5210	18881	0367	0357	0276	460	101	3143	93	1825	761	1029	1331	1293
10P2	5092	4993	4739	14824	0343	0337	0320	1219	180	281	113	2675	684	1020	1074	1054
13P1	8471	8016	7927	24414	0347	0328	0325	3051	38	368	237	2065	659	1057	1069	1011
13P2	5150	5030	4736	14916	0345	0337	0317	1108	164	2116	322	3579	528	1024	1087	1062
18P2	3896	3858	3839	11593	0336	0333	0331	3471	49	778	263	664	-647	1010	1015	1005
11salf9																
3P	1440	1439	1410	4289	0336	0336	0329	588	98	3281	16	2285	799	1001	1021	1021
5P	3668	3636	3324	10628	0345	0342	0313	913	-121	83	290	1613	580	1009	1104	1094
6P	2041	2026	1957	6025	0339	0336	0325	2963	98	248	-91	732	765	1008	1043	1035
7P	1813	1803	1746	5362	0338	0336	0326	3286	206	600	37	1599	690	1005	1038	1033
8P	1473	1466	1371	4310	0342	0340	0318	801	29	3500	35	2096	854	1005	1074	1069
10P	3721	3616	3489	10826	0344	0334	0322	3537	-07	838	-39	737	860	1029	1066	1036
12P	7095	7057	6340	20492	0346	0344	0309	3447	-24	747	11	3193	873	1005	1119	1113
15P	6550	6280	5216	18046	0363	0348	0289	835	165	3483	170	2150	658	1043	1256	1204
16P	3209	3190	2650	9049	0355	0352	0293	772	52	3476	-36	2916	836	1006	1211	1204
18Pa	5440	5260	4509	15209	0358	0346	0296	1337	154	411	92	2810	718	1034	1207	1167
18Pb	4326	4154	3482	11962	0362	0347	0291	78	31	996	289	2721	608	1041	1242	1193
20P	4732	4705	4289	13726	0345	0343	0312	378	87	3096	-116	2716	754	1006	1103	1097
11salf10																
1P1	6111	5881	5669	17662	0346	0333	0321	00	00	00	00	00	00	1038	1077	1037
1P4	7060	7030	6650	20740	0340	0339	0321	968	308	335	-367	3390	380	1004	1062	1057
2P0	3413	3317	2708	9438	0362	0351	0287	3238	93	554	98	1910	764	1029	1260	1225
2P1	1378	1356	1353	4087	0337	0332	0331	3322	135	485	-444	747	417	1016	1018	1002
3P4	1679	1664	1639	4982	0336	0334	0329	303	315	2778	327	1533	415	1007	1022	1015
3P6	1423	1412	1396	4231	0336	0334	0330	3470	84	817	262	607	-621	1008	1019	1012
9P0	2115	2098	1959	6172	0343	0340	0317	2774	-43	77	-54	3293	831	1008	1080	1071
9P1	n.m.															
10P1	2388	2321	2204	6913	0345	0336	0319	1176	170	2187	321	39	525	1029	1084	1053
10P2	2200	2176	2026	6402	0344	0340	0317	3238	93	554	98	1910	764	1011	1086	1074
12P0	419	416	400	1235	0339	0337	0324	303	-17	2996	-160	3060	739	1007	1048	1040
12P3	519	515	499	1532	0339	0336	0326	3505	10	802	99	2544	800	1009	1039	1031
11salf12																
2P	3285	3133	2637	9055	0363	0346	0291	330	65	3027	20	1952	831	1048	1246	1188
3P	3586	3510	2690	9786	0366	0359	0275	369	100	3067	11	2102	798	1022	1333	1305
5P	4540	4370	3910	12820	0354	0341	0305	1153	-119	267	65	1453	764	1039	1161	1118
9P	1820	1803	1750	5373	0339	0336	0326	3255	110	561	29	1607	785	1009	1040	1030
10P	4670	4648	3755	13073	0357	0356	0287	1537	16	643	-321	611	578	1005	1244	1238
11P	3989	3982	3273	11244	0355	0354	0291	251	00	2951	-187	2951	713	1002	1219	1217
12P	3867	3706	3259	10832	0357	0342	0301	145	08	1045	08	2397	888	1043	1187	1137
13P	2675	2636	2517	7828	0342	0337	0322	988	111	63	123	2296	732	1015	1063	1047
14P	3637	3578	3268	10483	0347	0341	0312	907	-51	18	118	1580	770	1016	1113	1095
15P	4147	3887	3536	11570	0358	0336	0306	2948	161	354	323	1823	529	1067	1173	1099
15P'	4340	4110	3717	12167	0357	0338	0306	2981	61	2073	74	674	802	1056	1168	1106
18P	4507	4268	3789	12564	0359	0340	0302	2446	175	2257	35	768	720	1056	1189	1126

N ech	K1S	K2S	K3S	KtS	K1S/ KtS	K2S/ KtS	K3S/ KtS	DK1S	IK1S	DK2S	IK2S	DK3S	IK3S	K1S/ K2S	K1S/ K3S	K2S/ K3S
11salf13																
3T1	1153	1131	1120	3404	0339	0332	0329	1071	14	172	-43	3580	855	1020	1030	1010
3T2	713	712	687	2112	0338	0337	0325	1328	00	428	-134	428	766	1001	1038	1036
6T1	642	630	607	1879	0342	0335	0323	1103	-105	-402	114	320	479	1019	1058	1038
6T2	670	665	644	1979	0339	0336	0325	687	-78	3380	-58	315	803	1008	1040	1033
12T1	782	760	722	2264	0345	0336	0319	2310	02	3212	248	1403	651	1029	1083	1053
12T2	745	732	693	2170	0343	0337	0319	3418	-85	647	394	2617	492	1018	1075	1056
13T1	8366	8039	6534	22939	0365	0350	0285	3239	457	41	-367	774	211	1041	1280	1230
13T2	9703	9390	6710	25803	0376	0364	0260	3593	199	898	15	1840	699	1033	1446	1399
14T1	753	751	714	2218	0340	0339	0322	3521	-73	828	-76	387	794	1003	1055	1052
14T2	774	769	728	2271	0341	0339	0321	723	-42	3433	130	1448	762	1007	1063	1056
14T3	1799	1785	1748	5332	0337	0335	0328	3444	48	775	346	2475	550	1008	1029	1021
11salf14																
1P1	893	887	839	2619	0341	0339	0320	666	168	3341	84	2186	710	1007	1064	1057
1P2	837	834	804	2475	0338	0337	0325	694	52	3377	175	1755	716	1004	1041	1037
2P1	854	827	806	2487	0343	0333	0324	3485	-76	772	91	2973	781	1033	1060	1026
2P2	576	564	549	1689	0341	0334	0325	3495	06	794	-51	863	849	1021	1049	1027
3P1A	896	895	805	2596	0345	0345	0310	469	00	3169	-96	3169	804	1001	1113	1112
3P1B	949	924	842	2715	0350	0340	0310	690	-09	3389	-04	451	890	1027	1127	1097
4P1	6066	5654	4884	16604	0365	0340	0294	3466	148	1247	703	2532	125	1073	1242	1158
4P3	5430	5100	4770	15300	0355	0333	0312	413	149	1356	157	1699	680	1065	1138	1069
9P1B	697	687	655	2039	0342	0337	0321	3360	58	551	-618	690	275	1015	1064	1049
9P2	536	523	499	1558	0344	0336	0320	1355	154	111	638	2314	205	1025	1074	1048
17P1C	740	733	680	2153	0344	0340	0316	11	29	2702	36	1299	852	1010	1088	1078
17P2	811	805	746	2362	0343	0341	0316	835	-10	3536	-47	53	852	1008	1087	1079
11salf15																
1P	8255	8009	7410	23674	0349	0338	0313	801	-62	1669	279	14	612	1031	1114	1081
3P	5530	5430	4950	15910	0348	0341	0311	1121	128	225	-18	3001	770	1018	1117	1097
4P	3518	3435	2669	9622	0366	0357	0277	3152	72	450	-16	1230	826	1024	1318	1287
6P	4860	4828	4385	14073	0345	0343	0312	3216	88	537	133	1990	739	1007	1108	1101
10P	4325	4243	3517	12085	0358	0351	0291	1033	04	134	-08	3380	891	1019	1230	1206
11P	3877	3809	3232	10918	0355	0349	0296	650	136	3336	56	2215	751	1018	1200	1179
12P	1252	1225	1194	3671	0341	0334	0325	1084	-109	259	342	1834	535	1022	1049	1026
15P	1339	1333	1281	3953	0339	0337	0324	434	34	3121	227	1415	669	1005	1045	1041
17P	2970	2910	2660	8540	0348	0341	0312	309	52	1202	-77	1553	807	1021	1117	1094
18P	3750	3708	2988	10446	0359	0355	0286	2253	34	1335	265	3221	632	1011	1255	1241
19P	1305	1295	1247	3847	0339	0337	0324	833	264	1490	-393	1972	391	1008	1046	1038
20P	6385	6190	5080	17655	0362	0351	0288	3113	111	415	09	1365	787	1031	1257	1219

caractéristiques des tenseurs d'anisotropie de susceptibilité magnétique : N ech, échantillon, K1 R, K2 R, K3 R, valeurs propres maximales, intermédiaires et minimales, Kt R, somme des valeurs propres, K1R/Kt R, K2R/Kt R, K3R/Kt R, valeurs propres normalisées (psj dans le texte), D K1R, I K1R, D K2R, I K2R, D K3R, I K3R, déclinaisons et inclinaisons des vecteurs propres, K1R/K2R, K1R/K3R, K2R/K3R, rapports de linéation, degré d'anisotropie et foliation magnétique, n.m., non mesuré.

**tableau récapitulatif des valeurs d'Anisotropie d'Aimantation Rémanente Isotherme**

Nech	K <sub>1i</sub>	K <sub>2i</sub>	K <sub>3i</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>1i</sub> / K <sub>i</sub>	K <sub>2i</sub> / K <sub>i</sub>	K <sub>3i</sub> / K <sub>i</sub>	DK <sub>1i</sub>	IK <sub>1i</sub>	DK <sub>2i</sub>	IK <sub>2i</sub>	DK <sub>3i</sub>	IK <sub>3i</sub>	K <sub>1i</sub> / K <sub>2i</sub>	K <sub>1i</sub> / K <sub>3i</sub>	K <sub>2i</sub> / K <sub>3i</sub>
31tab1																
8B	1.107	1.010	0.883	3.00	0.369	0.337	0.294	353	36.7	-87.0	35.6	154.8	33.5	1.097	1.253	1.143
11salf14																
1P2	1.072	1.029	0.899	3.00	0.357	0.343	0.300	499	23.4	-42.2	4.8	-143.0	66.0	1.042	1.193	1.145

caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'ARI : les valeurs propres normalisées, K<sub>1i</sub>/K<sub>i</sub>, K<sub>2i</sub>/K<sub>i</sub>, K<sub>3i</sub>/K<sub>i</sub>, sont référencées par p<sub>ij</sub> dans le texte.

**tableau récapitulatif des valeurs d'Anisotropie d'Aimantation Rémanente Anhystérétique**

Nech	K <sub>1r</sub>	K <sub>2r</sub>	K <sub>3r</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>1r</sub> / K <sub>r</sub>	K <sub>2r</sub> / K <sub>r</sub>	K <sub>3r</sub> / K <sub>r</sub>	DK <sub>1r</sub>	IK <sub>1r</sub>	DK <sub>2r</sub>	IK <sub>2r</sub>	DK <sub>3r</sub>	IK <sub>3r</sub>	K <sub>1r</sub> / K <sub>2r</sub>	K <sub>1r</sub> / K <sub>3r</sub>	K <sub>2r</sub> / K <sub>3r</sub>
35044A																
9T	1.149	1.043	0.808	3.00	0.383	0.348	0.269	-156.6	13.6	110.1	13.4	-22.8	70.7	1.102	1.423	1.291
21T	1.147	1.009	0.844	3.00	0.382	0.336	0.281	0.8	-3.0	-89.5	-4.3	-54.4	84.8	1.136	1.359	1.196
32T	1.098	1.058	0.843	3.00	0.366	0.353	0.281	-44.5	0.6	-134.5	4.4	53.0	85.6	1.038	1.303	1.255
70T	1.172	0.926	0.901	3.00	0.391	0.309	0.300	7.7	10.3	156.8	78.1	96.6	-6.0	1.266	1.301	1.028

caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'ATR : les valeurs propres normalisées, K<sub>1i</sub>/K<sub>i</sub>, K<sub>2i</sub>/K<sub>i</sub>, K<sub>3i</sub>/K<sub>i</sub>, sont référencées par p<sub>ri</sub> dans le texte.

Nech	K <sub>1a</sub>	K <sub>2a</sub>	K <sub>3a</sub>	K <sub>a</sub>	K <sub>1a</sub> / K <sub>a</sub>	K <sub>2a</sub> / K <sub>a</sub>	K <sub>3a</sub> / K <sub>a</sub>	DK <sub>1a</sub>	IK <sub>1a</sub>	DK <sub>2a</sub>	IK <sub>2a</sub>	DK <sub>3a</sub>	IK <sub>3a</sub>	K <sub>1a</sub> / K <sub>2a</sub>	K <sub>1a</sub> / K <sub>3a</sub>	K <sub>2a</sub> / K <sub>3a</sub>
35044A																
9T	1.142	1.043	0.815	3.00	0.381	0.348	0.272	27.1	3.6	-62.9	-0.3	-148.5	86.4	1.095	1.401	1.279
21T	1.168	1.065	0.767	3.00	0.389	0.355	0.256	-3.4	-5.5	-93.4	-0.7	-10.6	84.4	1.097	1.524	1.389
32T	1.075	1.045	0.880	3.00	0.358	0.348	0.293	-5.9	3.7	-95.4	-7.3	-122.3	81.8	1.029	1.223	1.188
70T	1.198	1.024	0.777	3.00	0.399	0.341	0.259	6.6	-1.1	-83.4	2.0	67.7	87.7	1.169	1.541	1.318

caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'ARA : les valeurs propres normalisées, K<sub>1i</sub>/K<sub>i</sub>, K<sub>2i</sub>/K<sub>i</sub>, K<sub>3i</sub>/K<sub>i</sub>, sont référencées par p<sub>aj</sub> dans le texte.

Nech	K <sub>1s</sub>	K <sub>2s</sub>	K <sub>3s</sub>	K <sub>s</sub>	K <sub>1s</sub> / K <sub>s</sub>	K <sub>2s</sub> / K <sub>s</sub>	K <sub>3s</sub> / K <sub>s</sub>	DK <sub>1s</sub>	IK <sub>1s</sub>	DK <sub>2s</sub>	IK <sub>2s</sub>	DK <sub>3s</sub>	IK <sub>3s</sub>	K <sub>1s</sub> / K <sub>2s</sub>	K <sub>1s</sub> / K <sub>3s</sub>	K <sub>2s</sub> / K <sub>3s</sub>
35044A																
9T	295.3	288.7	247.5	831.5	0.355	0.347	0.298	217.9	8.1	306.5	-10.0	346.6	77.1	1.022	1.166	1.192
21T	503.7	500.7	425.3	1429.7	0.352	0.350	0.297	316.6	-3.9	47.1	-8.1	21.	81	1.006	1.184	1.177
32T	544.1	534.7	487.3	1566.1	0.347	0.341	0.311	106.2	-5.8	17.3	10.3	167.7	78.1	1.017	1.116	1.097
70T	284.1	274.5	235.6	794.2	0.358	0.346	0.297	14.1	-1.3	104.0	3.6	303.4	86	1.034	1.165	1.206

caractéristiques des tenseurs d'anisotropie d'AMS : N ech, échantillon, K<sub>1 R</sub>, K<sub>2 R</sub>, K<sub>3 R</sub>, valeurs propres maximales, intermédiaires et minimales, K<sub>t R</sub>, somme des valeurs propres, K<sub>1R</sub>/K<sub>t R</sub>, K<sub>2R</sub>/K<sub>t R</sub>, K<sub>3R</sub>/K<sub>t R</sub>, valeurs propres normalisées (p<sub>sj</sub> dans le texte), D K<sub>1R</sub>, I K<sub>1R</sub>, D K<sub>2R</sub>, I K<sub>2R</sub>, D K<sub>3R</sub>, I K<sub>3R</sub>, déclinaisons et inclinaisons des vecteurs propres, K<sub>1R</sub>/K<sub>2R</sub>, K<sub>1R</sub>/K<sub>3R</sub>, K<sub>2R</sub>/K<sub>3R</sub>, rapports de linéation, degré d'anisotropie et foliation magnétique.



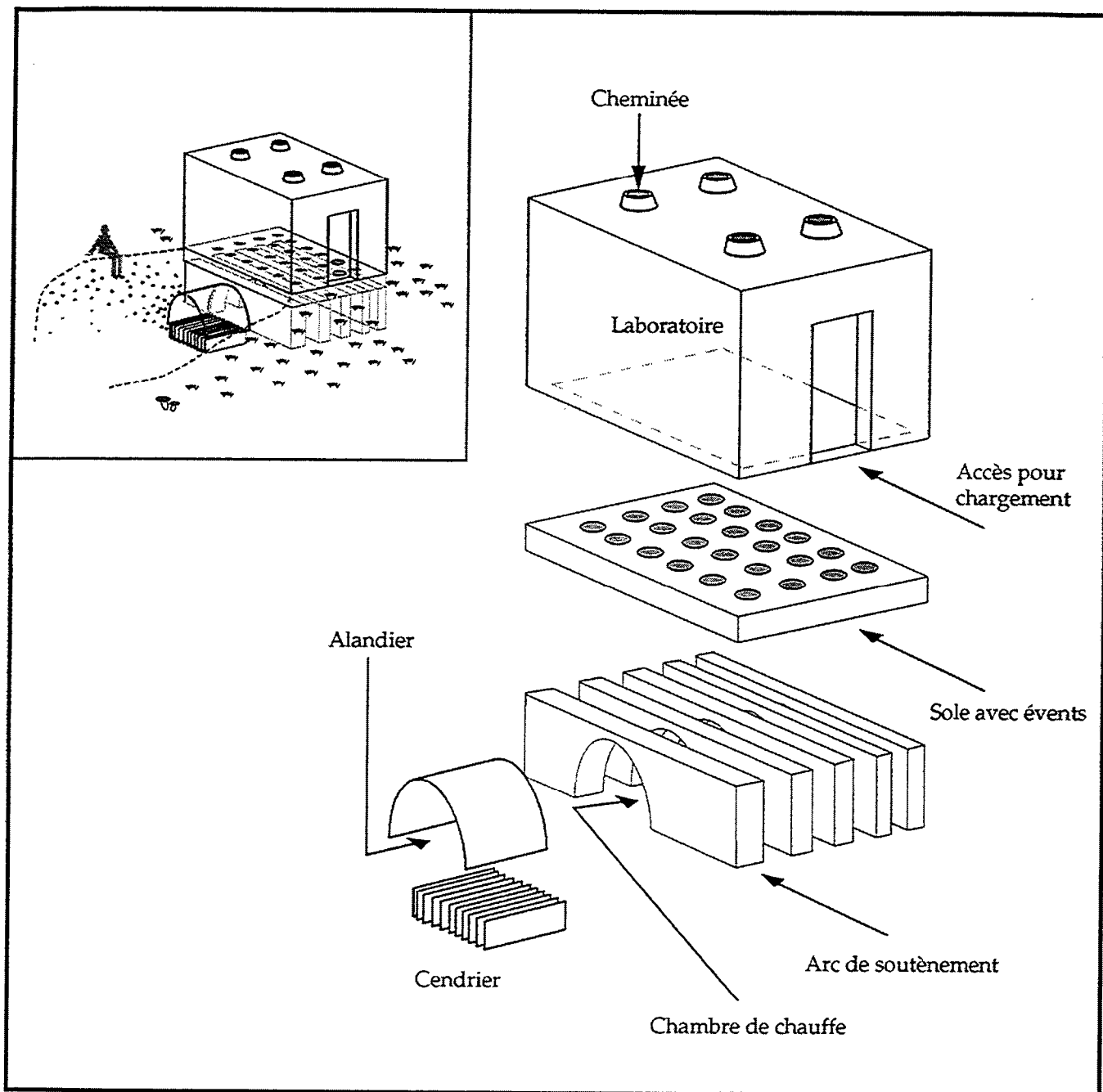
### Chapitre III

**"Etude de l'archéointensité sur divers sites gallo-romains et "modernes", situés en France."**

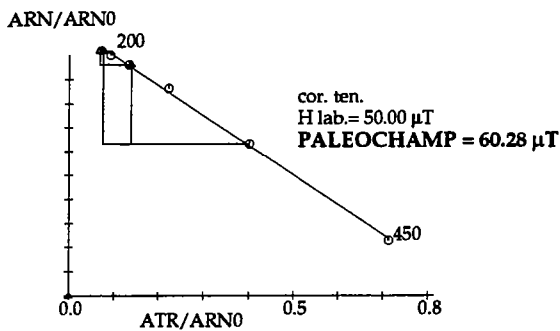
**documents annexes :**

- modèle synthétique de four,
- diagrammes d'Araï et de Zijderveld  
des échantillons étudiés.

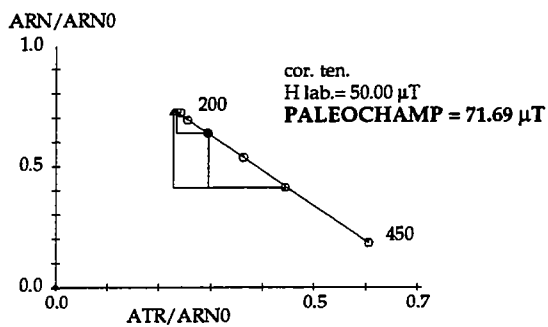
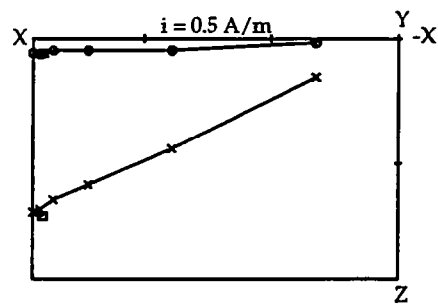




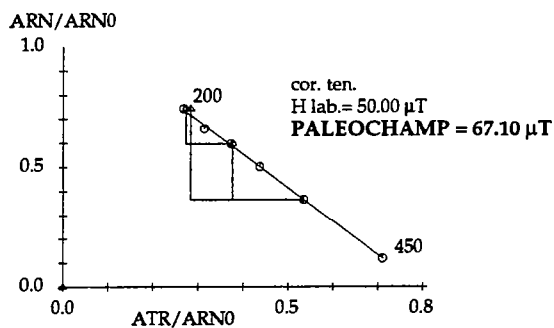
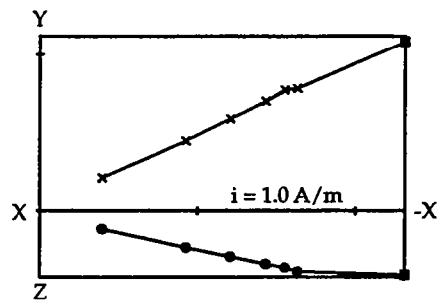
Vue éclatée d'un modèle synthétique de four, montrant les principales parties et éléments architecturaux. En insert, vue d'ensemble, les diverses pièces étant regroupées et à leur place.



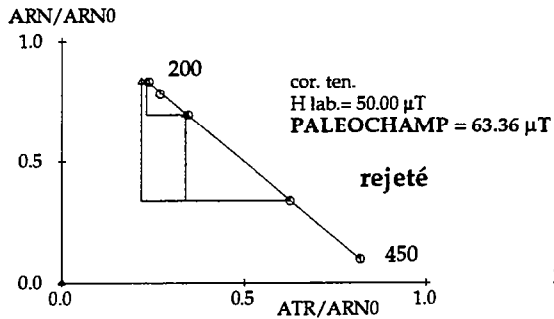
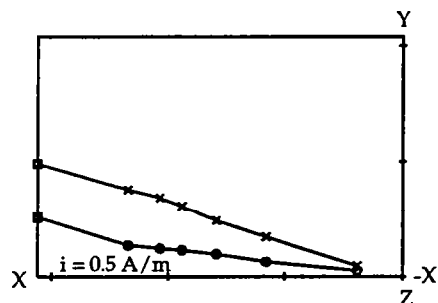
22179-40T



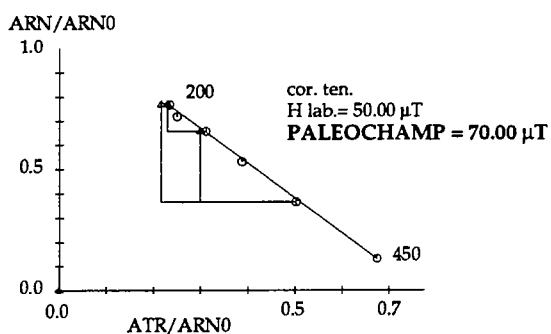
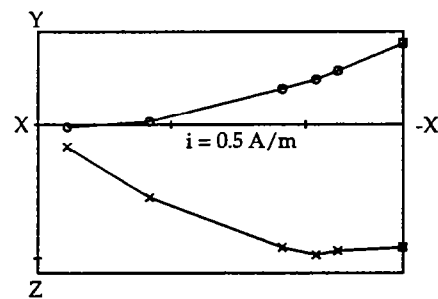
22179-52T



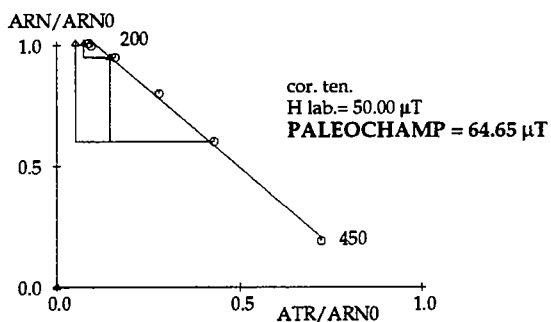
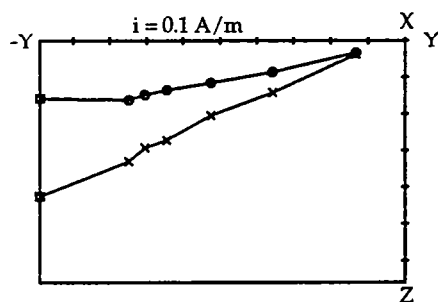
22179-57T



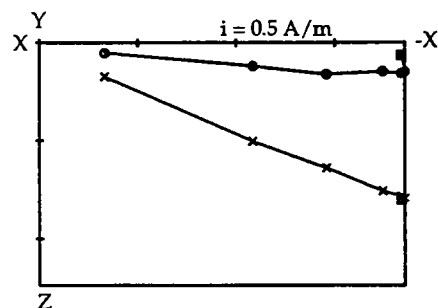
22179-63T

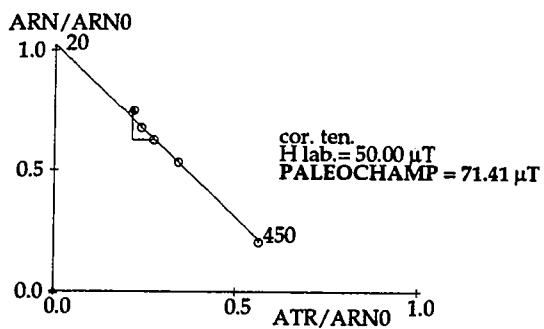


22179-77T

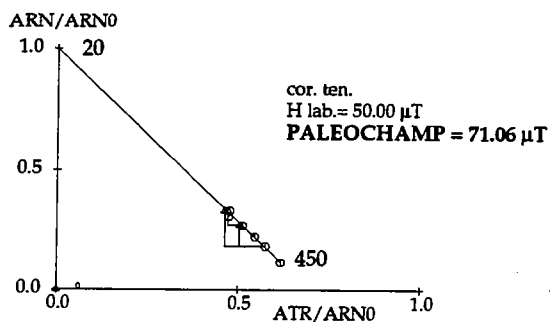
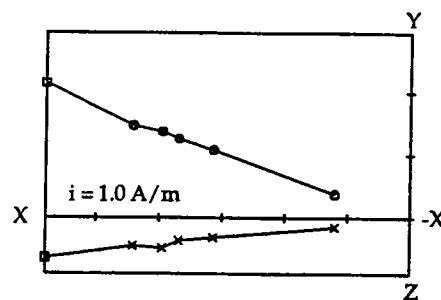


22179-78T

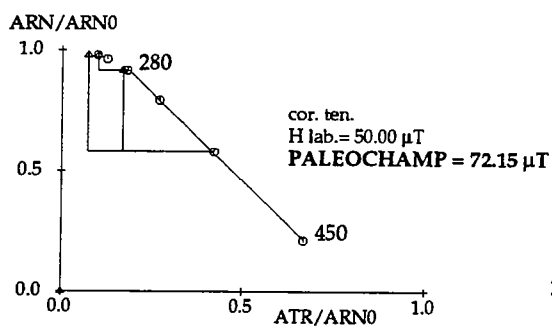
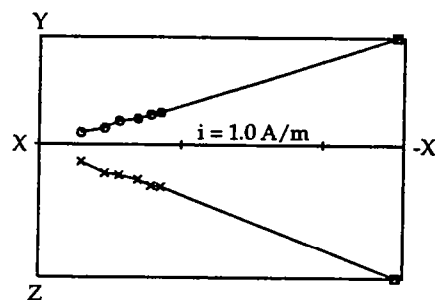




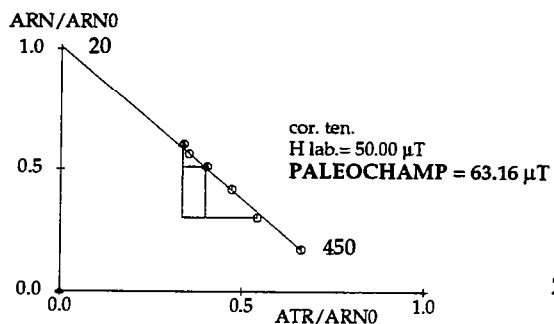
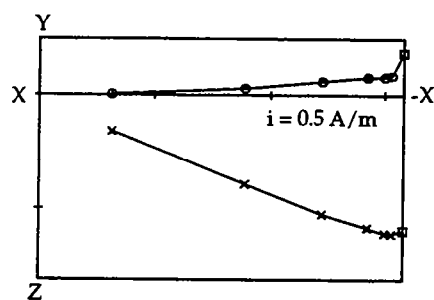
22179-92T



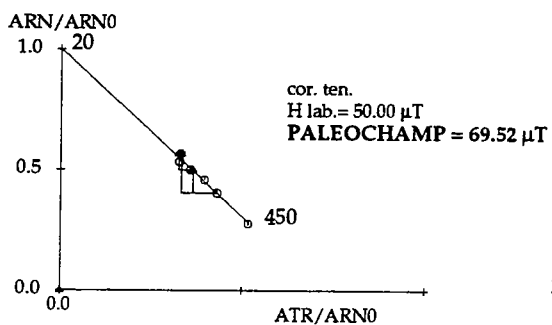
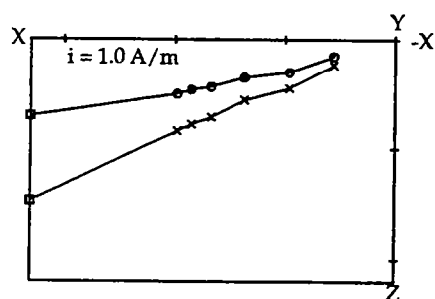
22179-106T



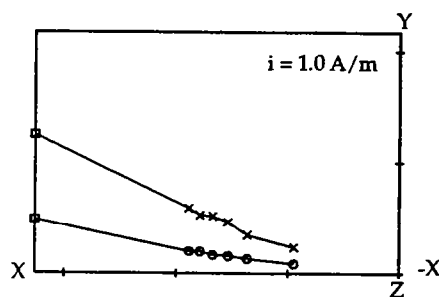
22179-112T

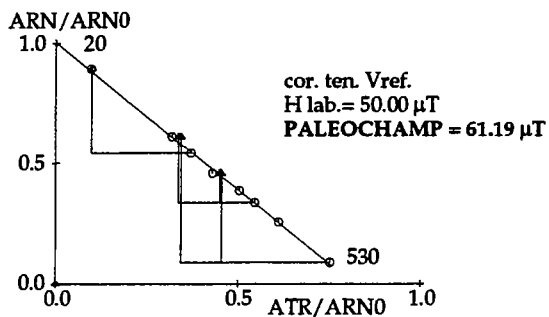


22179-127T

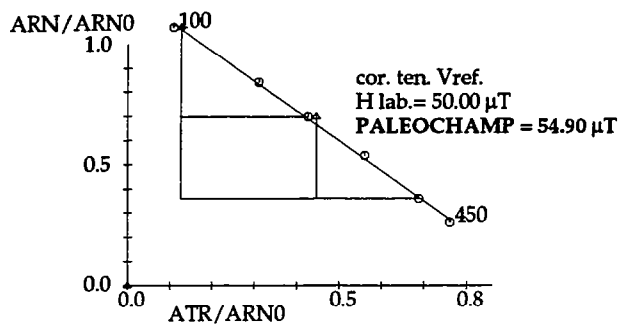
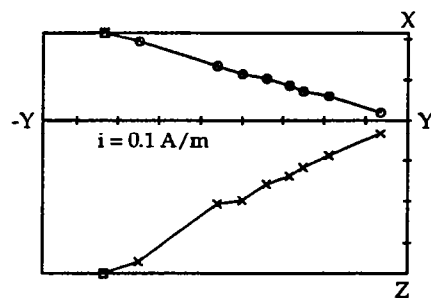


22179-138T

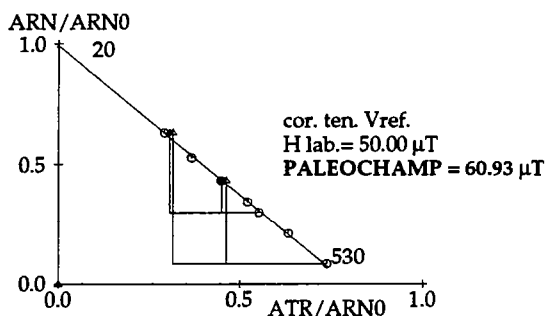
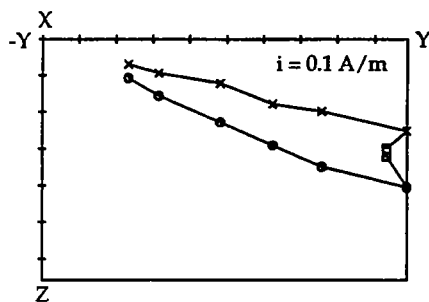




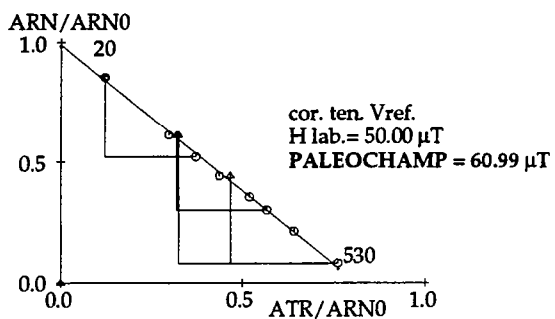
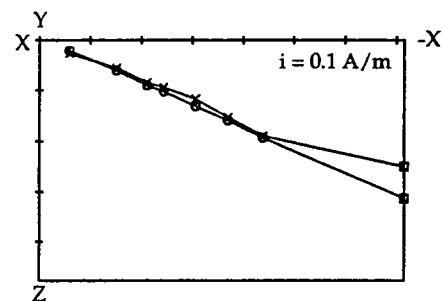
31HLP-8B



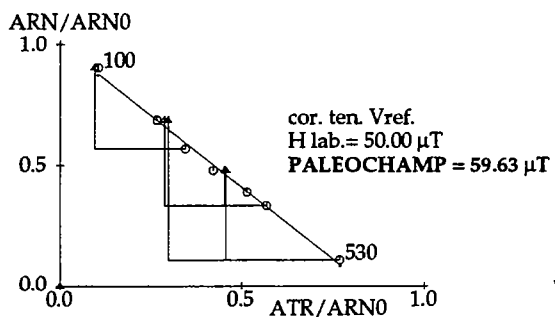
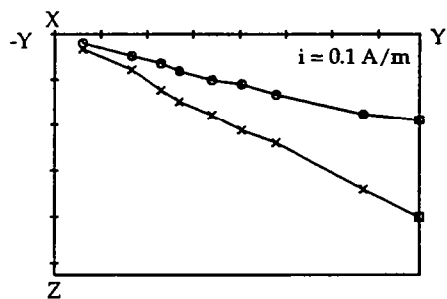
31HLP-18B



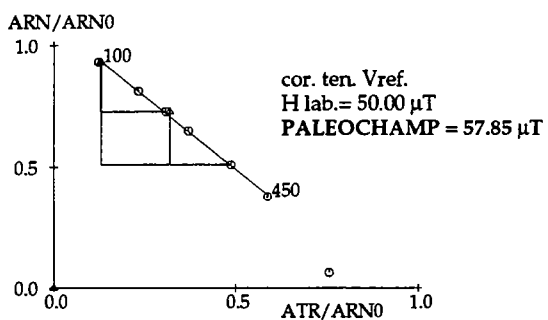
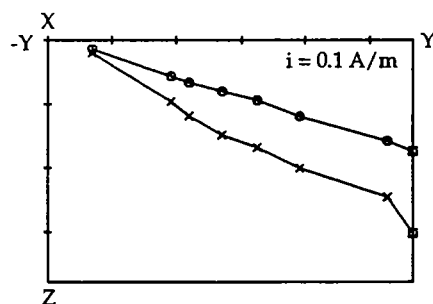
31HLP-22B



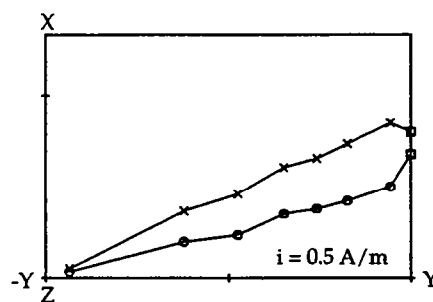
31HLP-52B

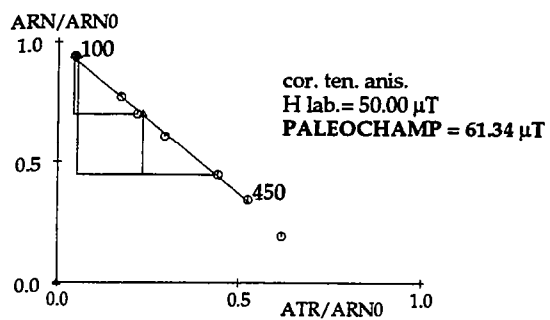


31HLP-59B

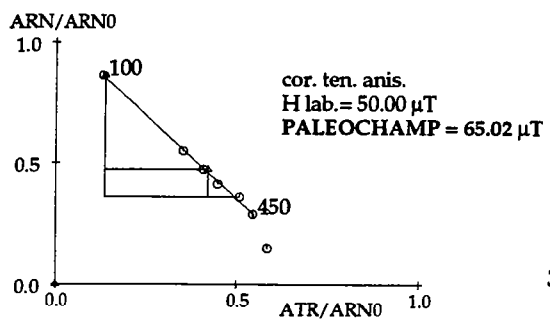
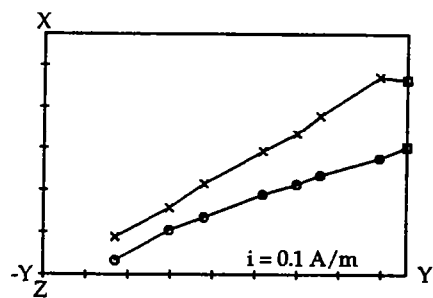


31HLP-90B

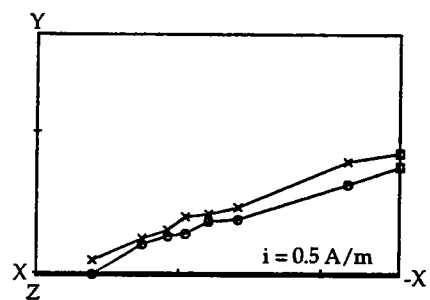


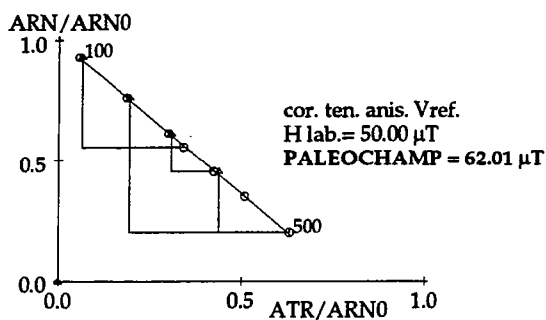


31HLP-92B

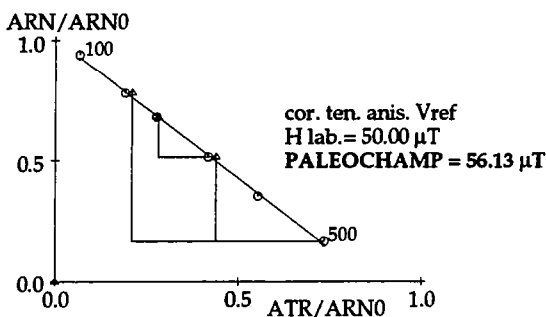
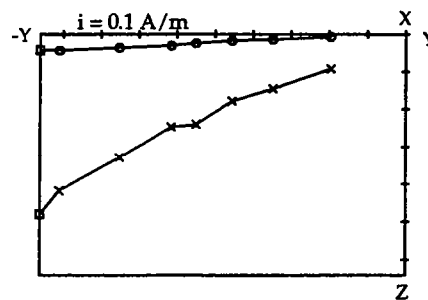


31HLP-95B

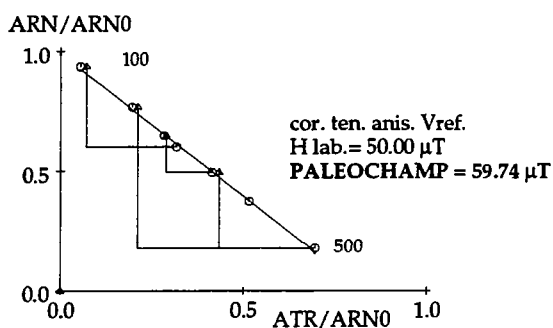
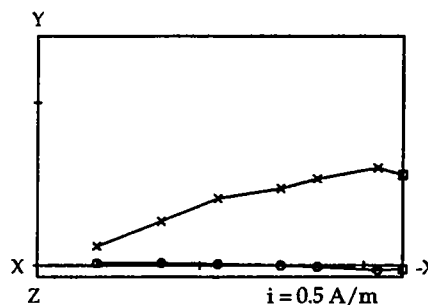




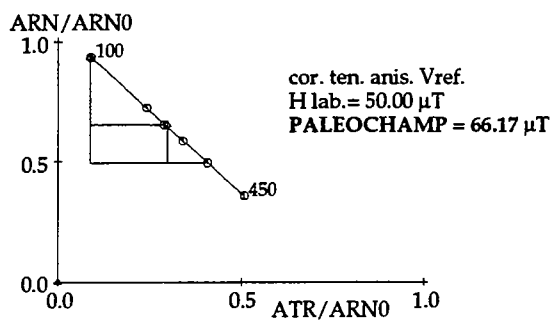
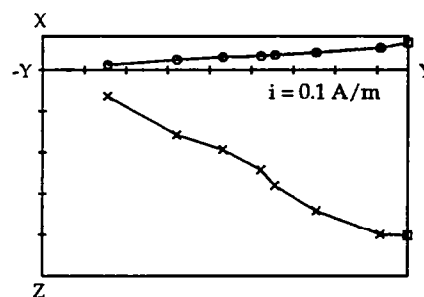
31HLR2-11B



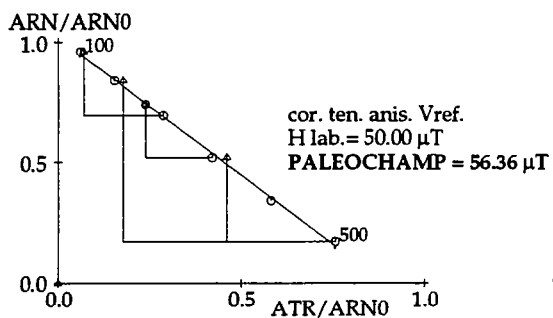
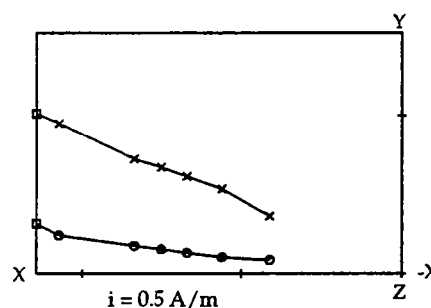
31HLR2-26B



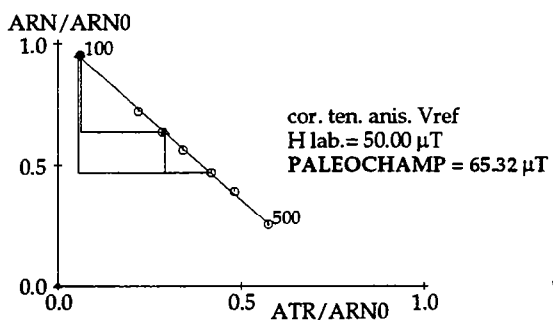
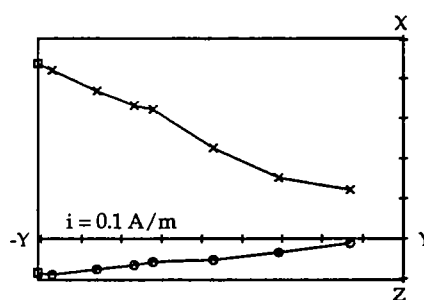
31HLR2-37B



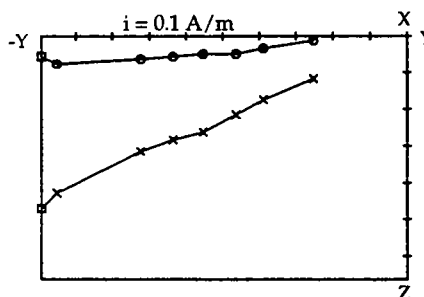
31HLR2-40B



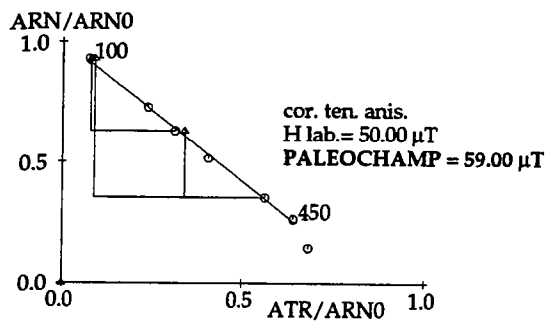
31HLR2-55B



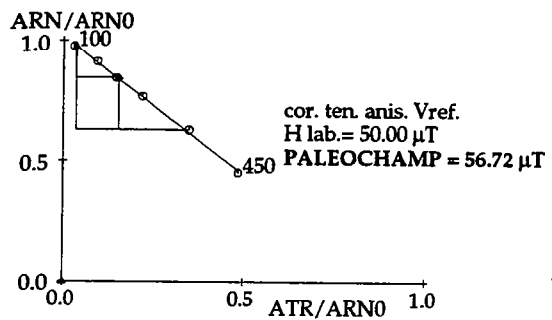
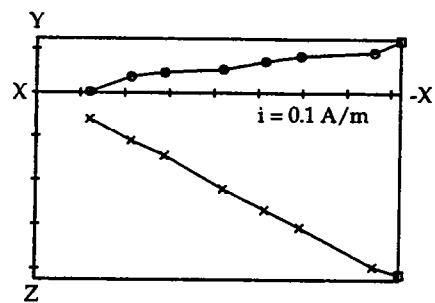
31HLR2-65B



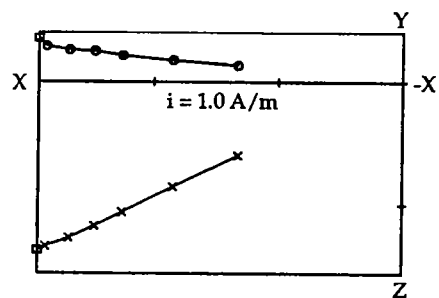


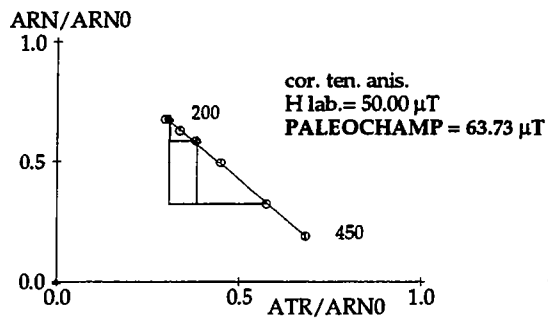


31HLR2-78B

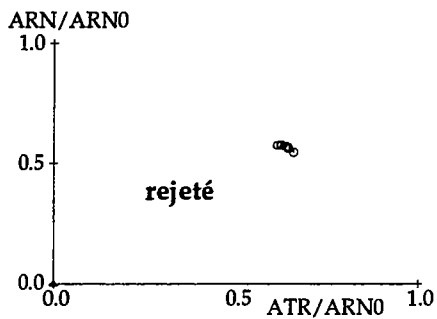
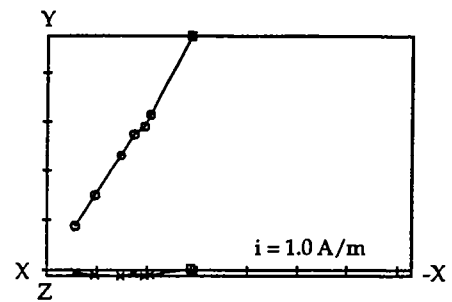


31HLR2-79B

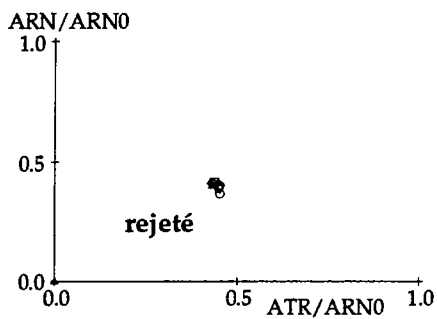
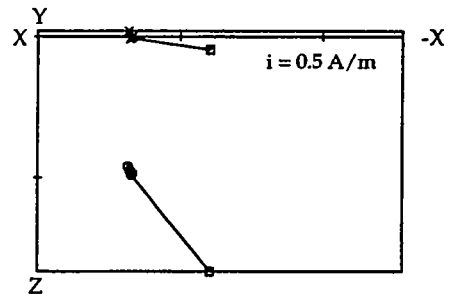




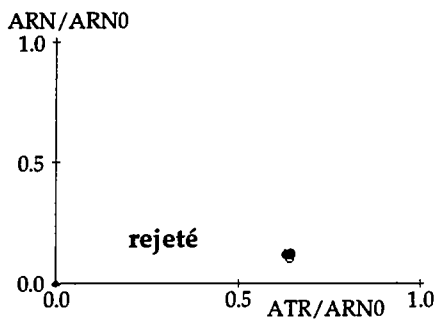
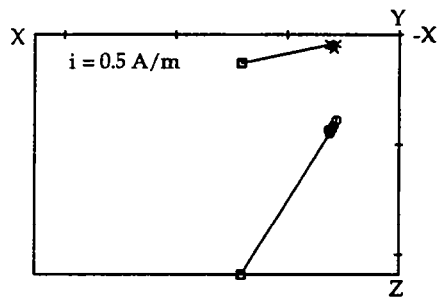
35127A-32B



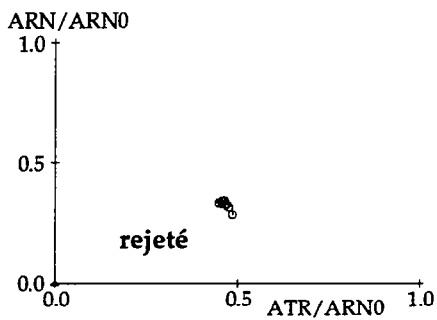
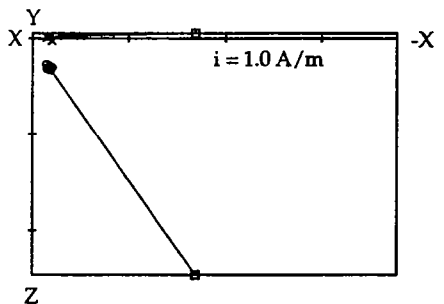
35127A-46B



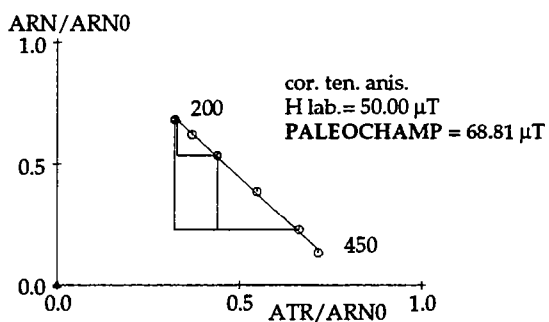
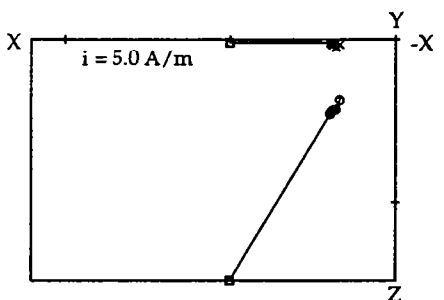
35127A-53B



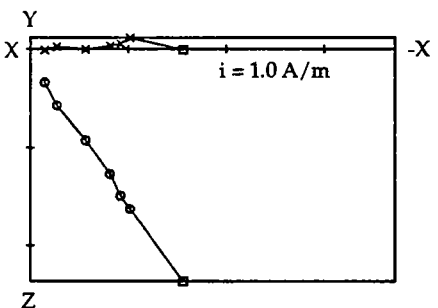
35127A-79B

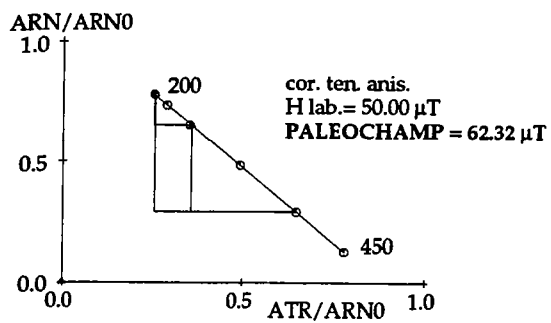


35127A-112B

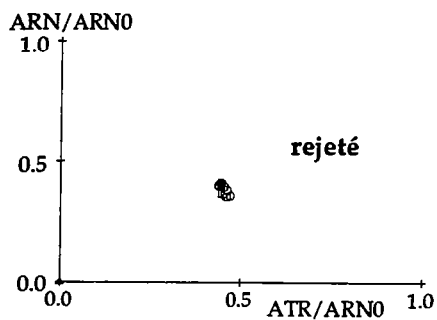
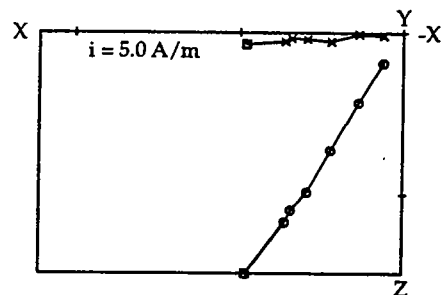


35127A-147B

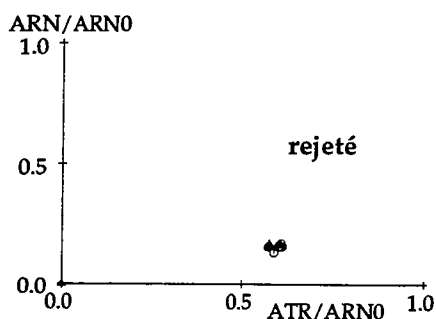
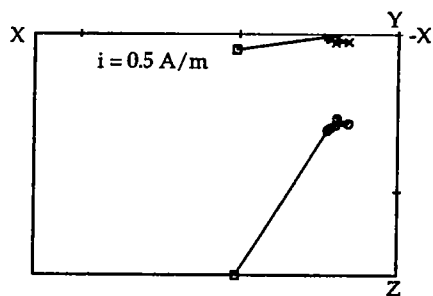




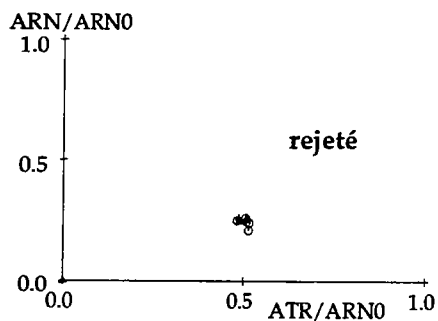
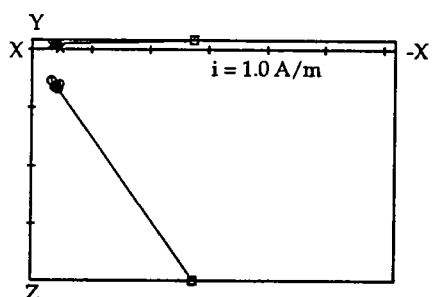
35127A-159B



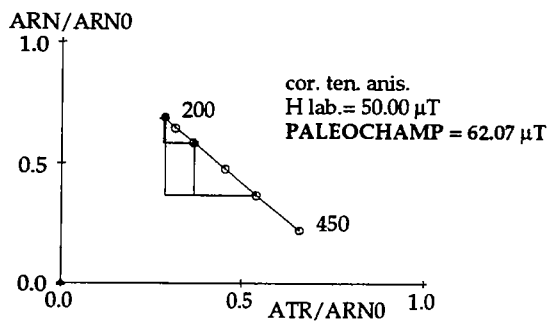
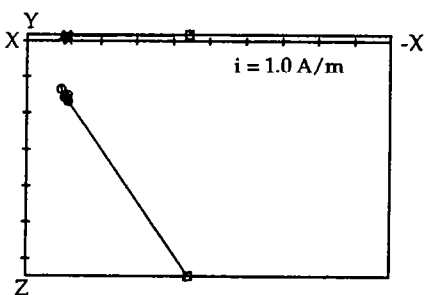
35127A-174B



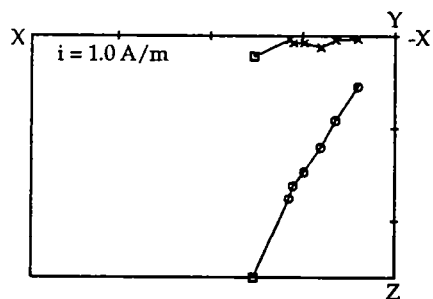
35127A-180B

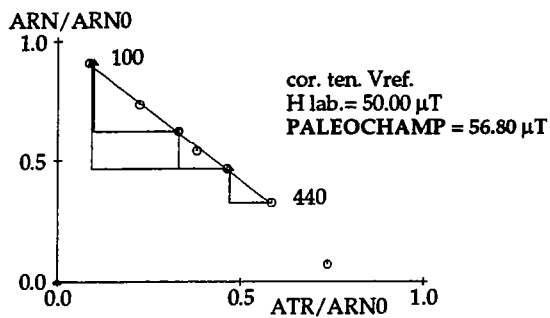


35127A-206B

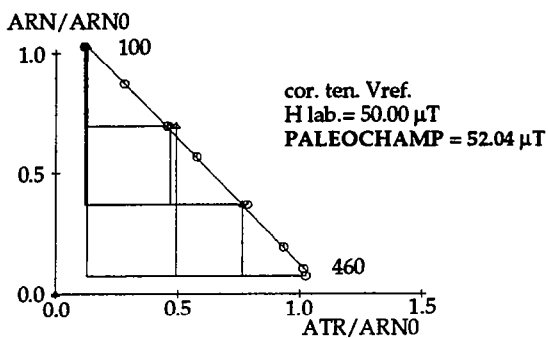
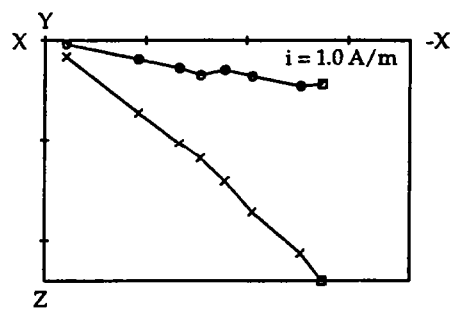


35127A-209B

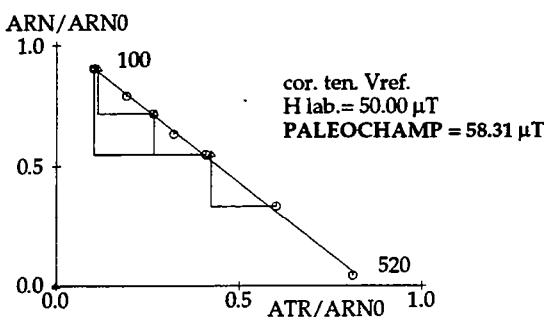
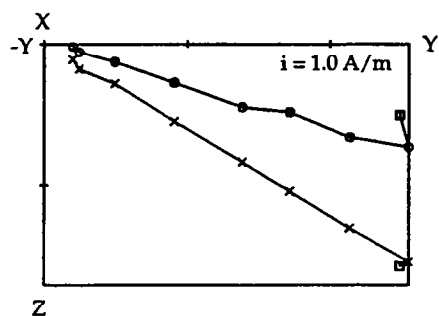




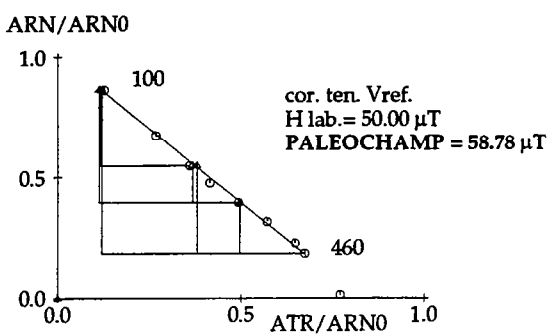
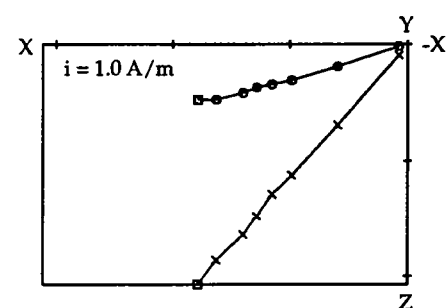
31TAB1-3B



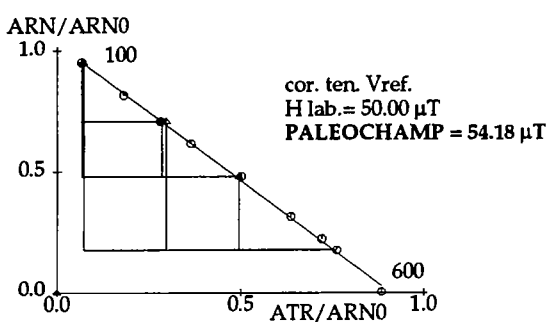
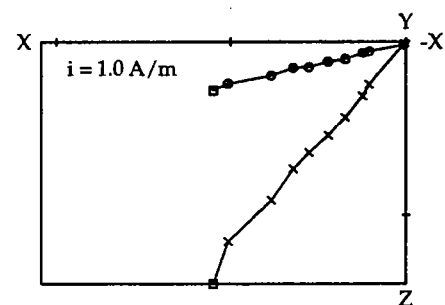
31TAB1-8B



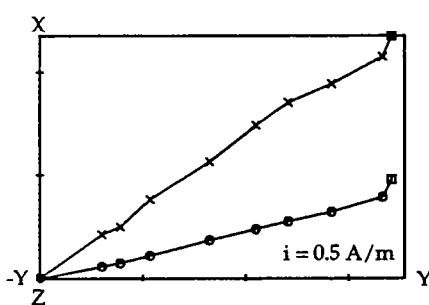
31TAB1-17B

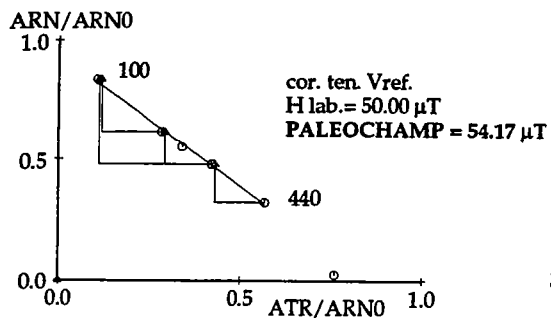


31TAB1-20B

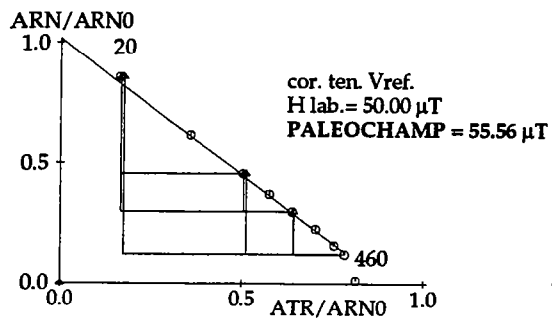
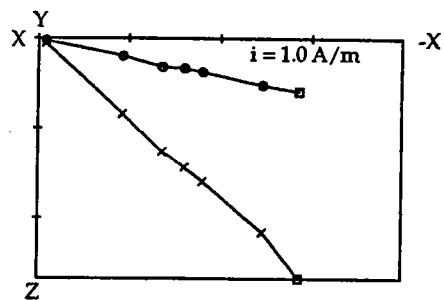


31TAB1-32B

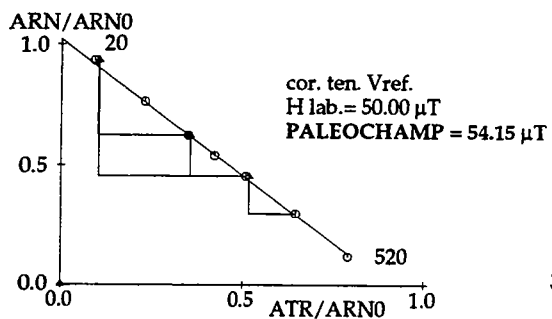
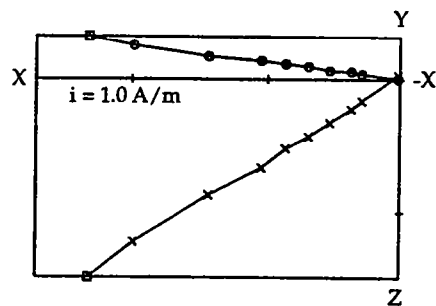




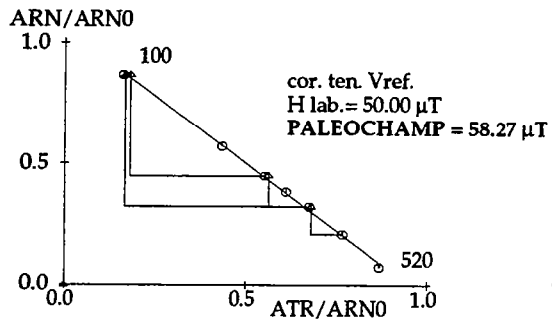
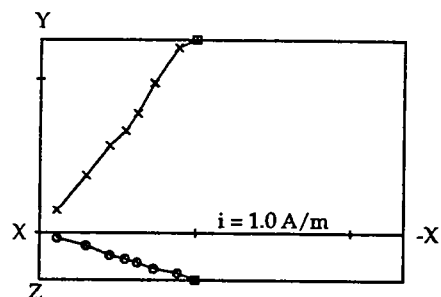
31TAB1-72B



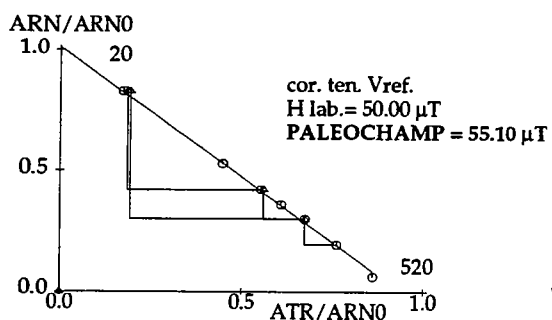
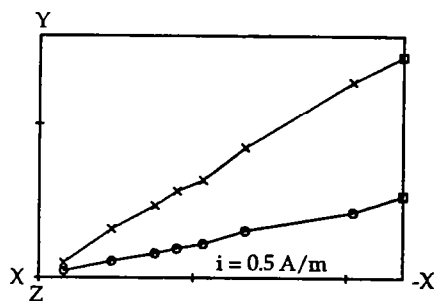
31TAB1-80B



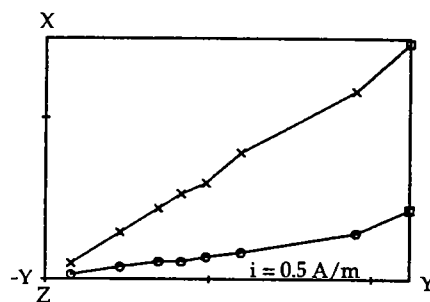
31TAB1-81B

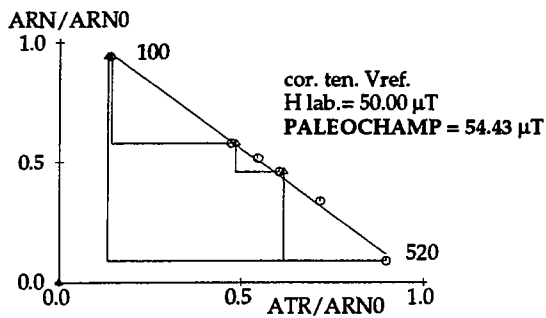


31TAB1-87B

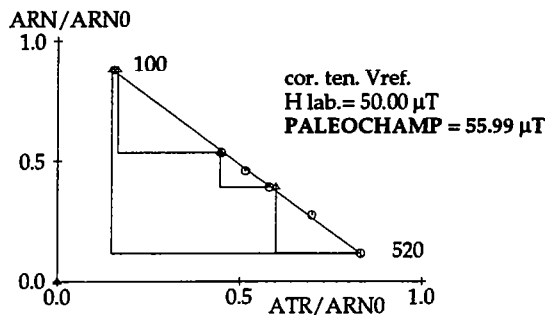
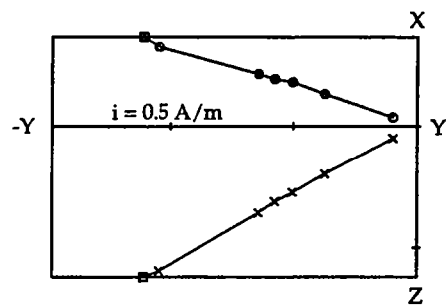


31TAB1-92B

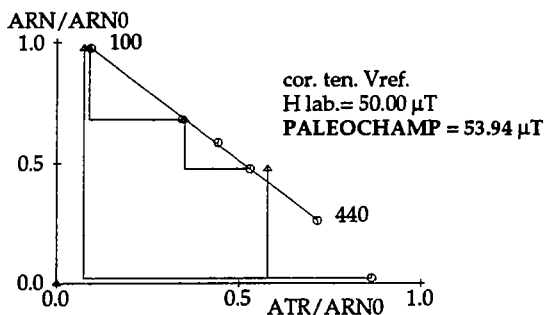
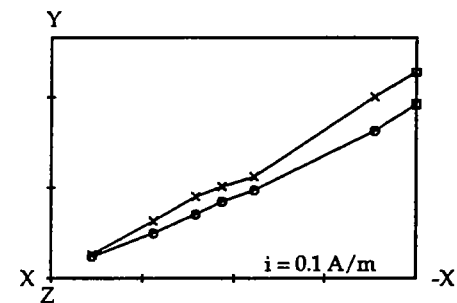




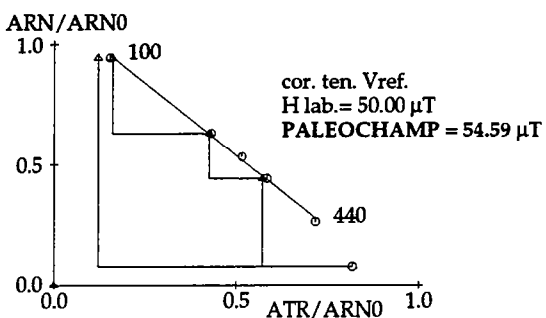
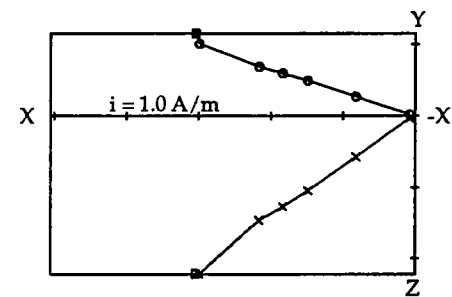
31TAB3-9B



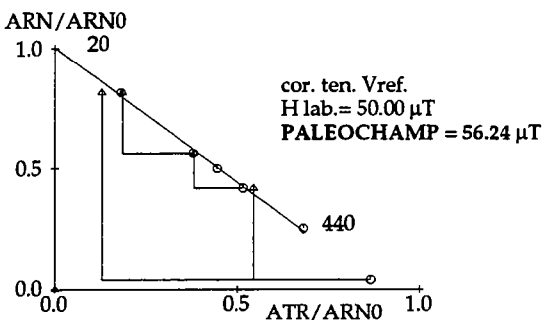
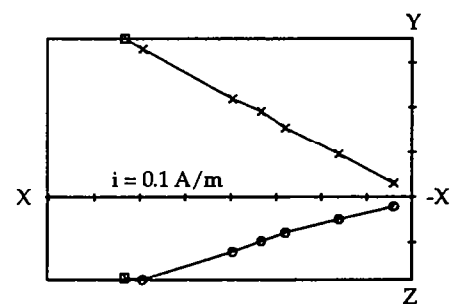
31TAB3-23B



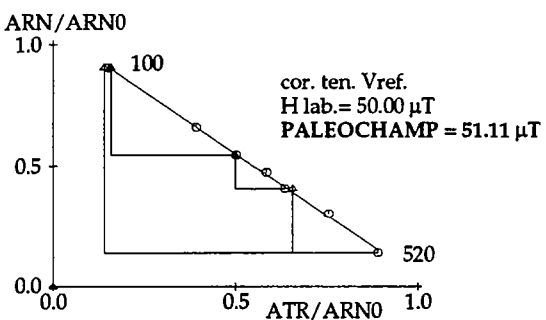
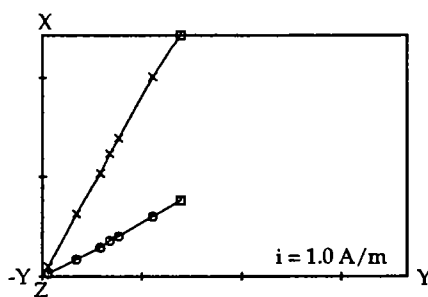
31TAB3-34B



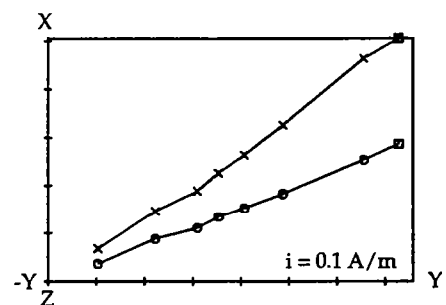
31TAB3-40B

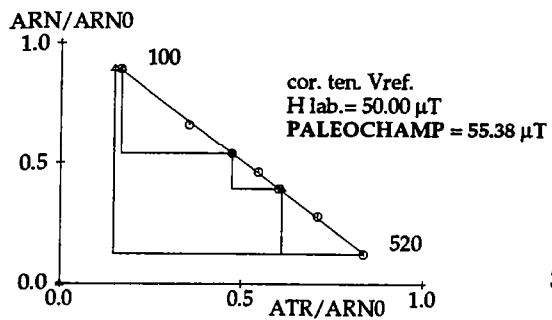


31TAB3-51B

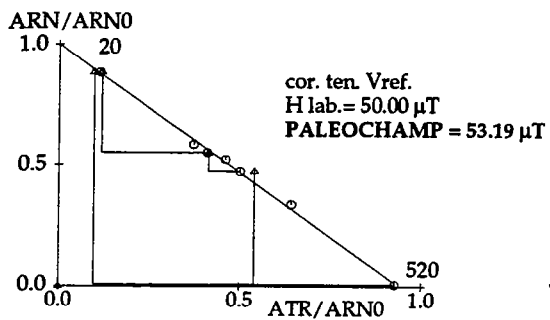
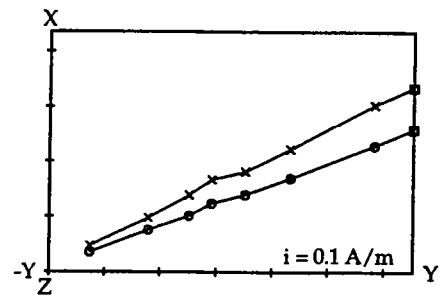


31TAB3-55B

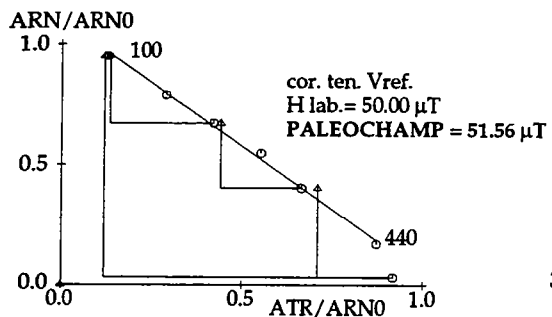
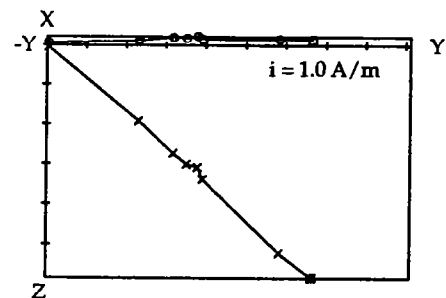




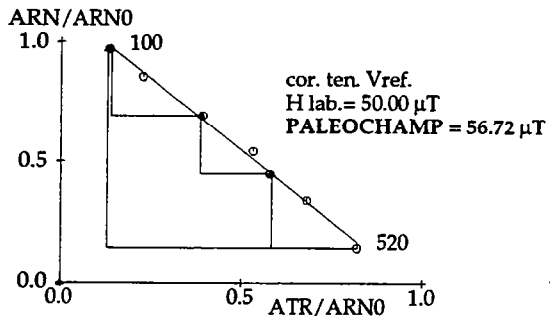
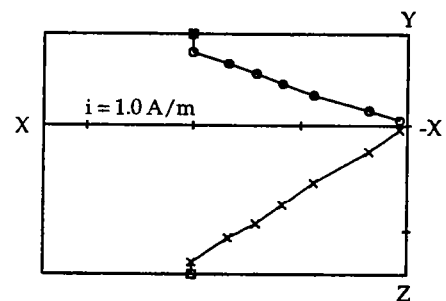
31TAB3-57B



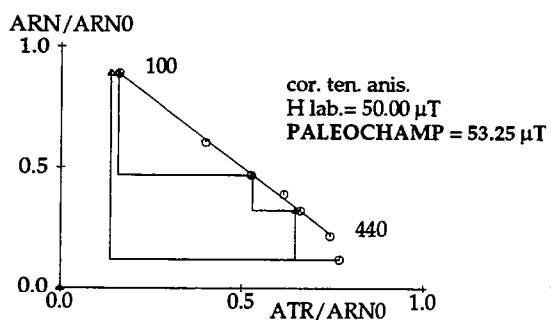
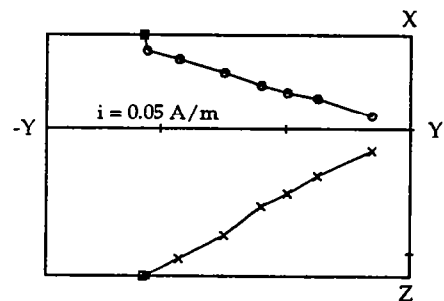
31TAB3-61B



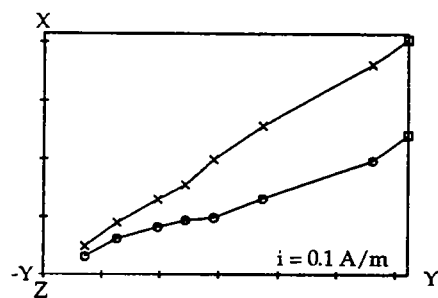
31TAB3-65B

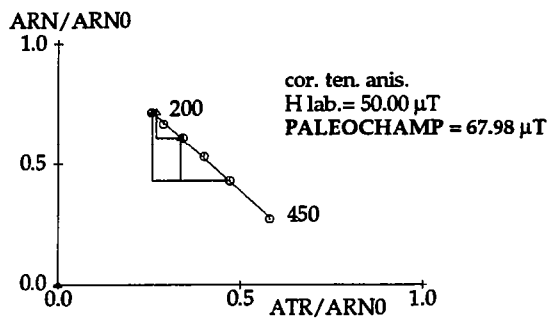


31TAB3-67B

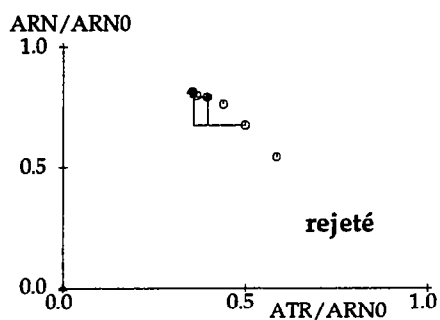
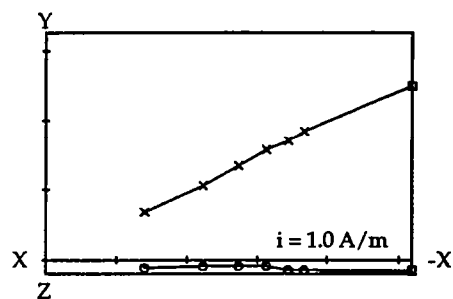


31TAB3-69B

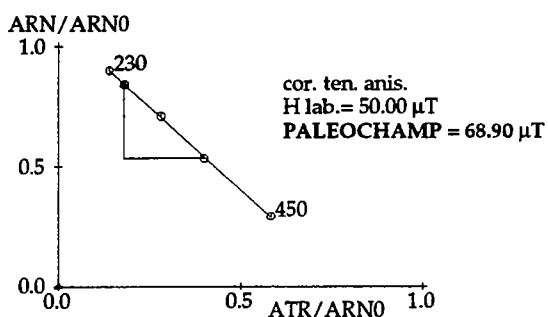
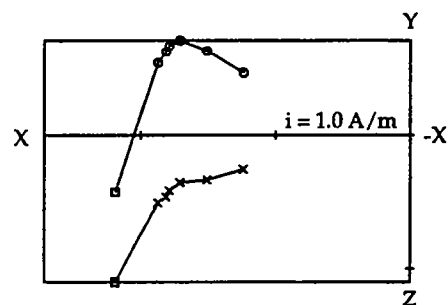




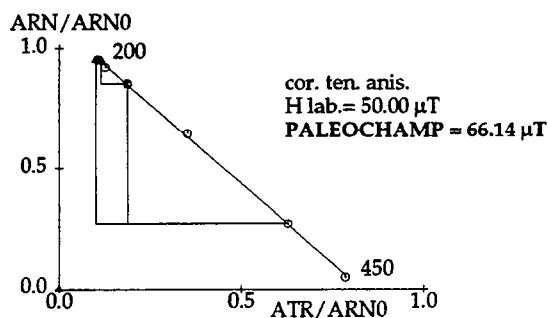
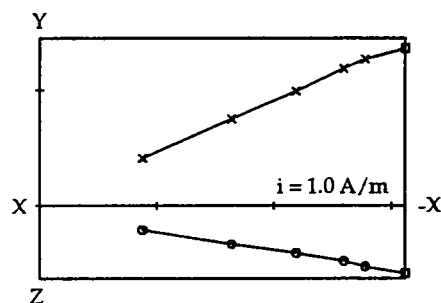
35288A-68T



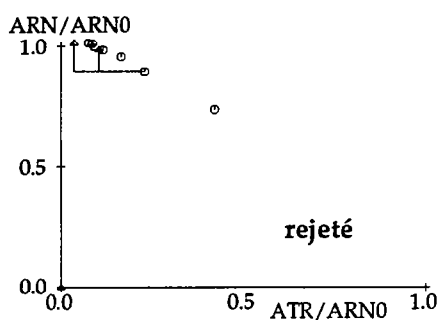
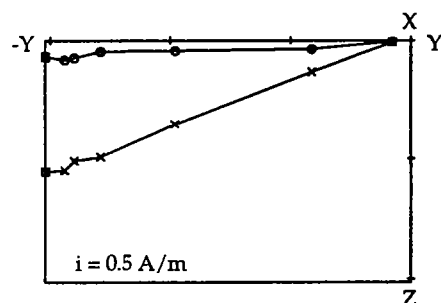
35288A-82T



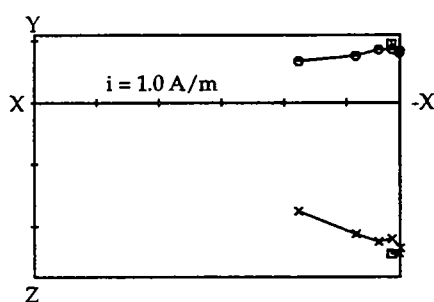
35288A-93T



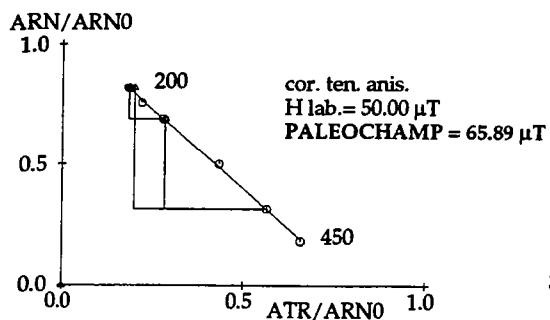
35288A-135T



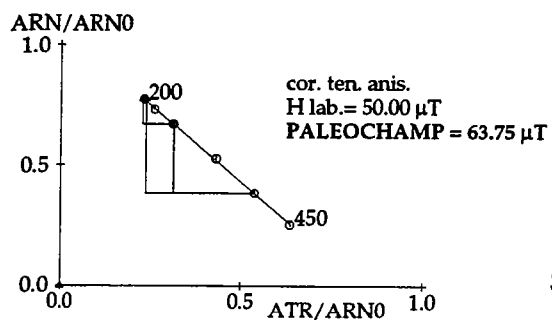
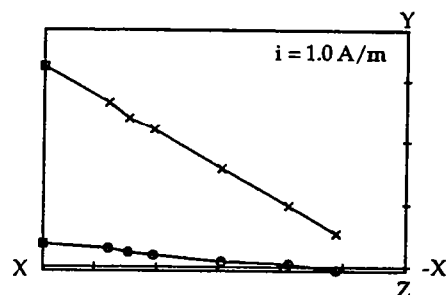
35288A-150T



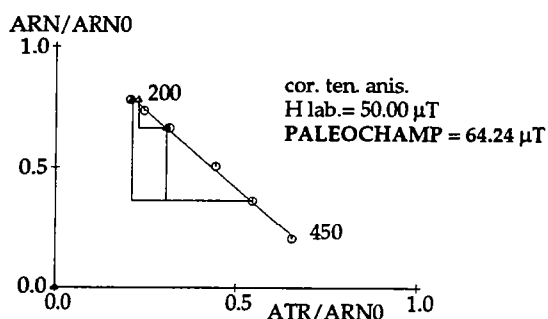
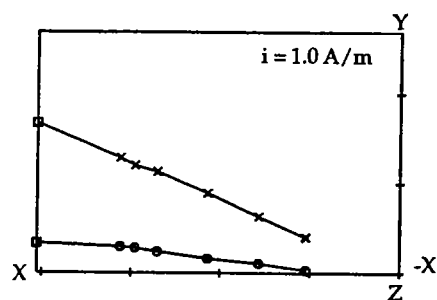




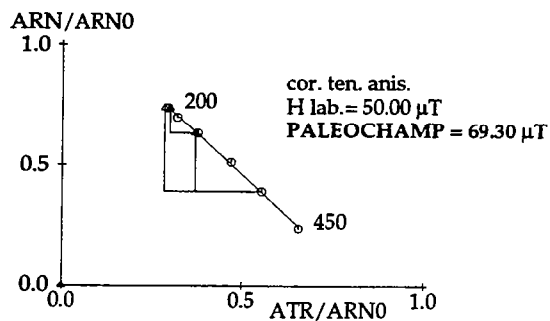
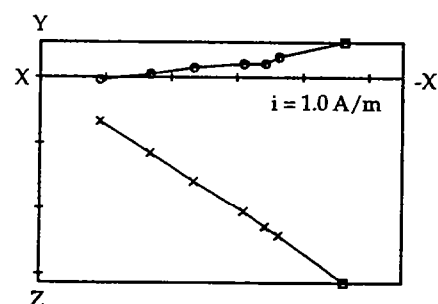
35288A-161T



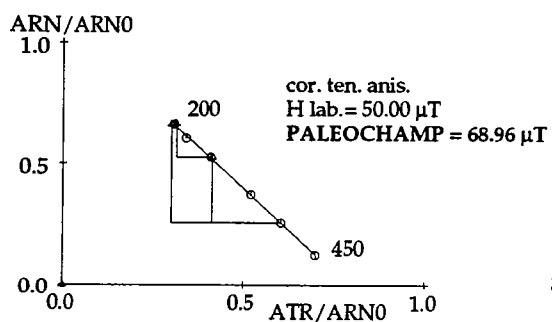
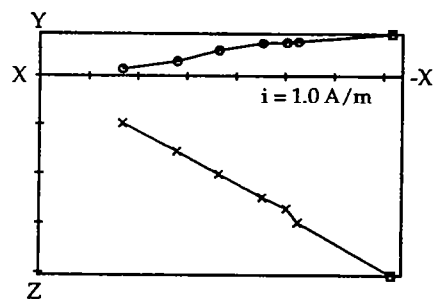
35288A-169T



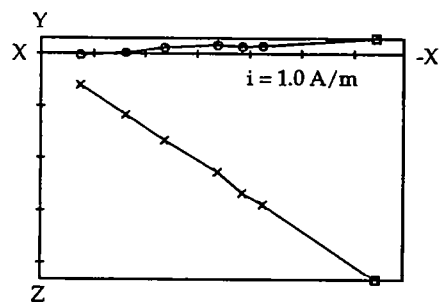
35288A-176T

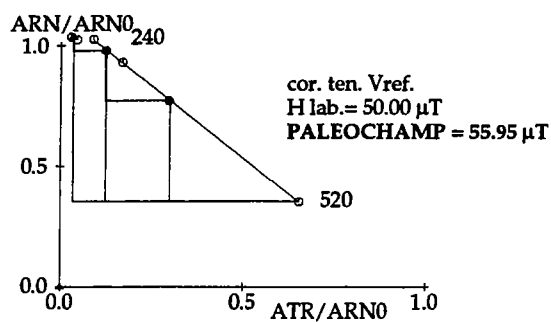


35288A-198T

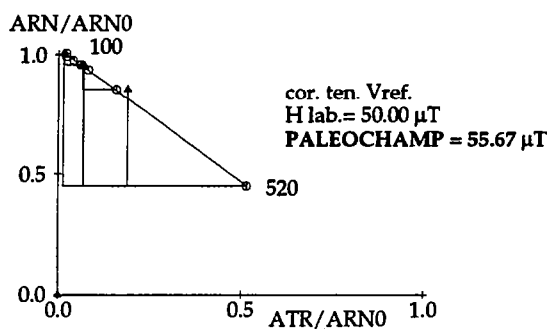
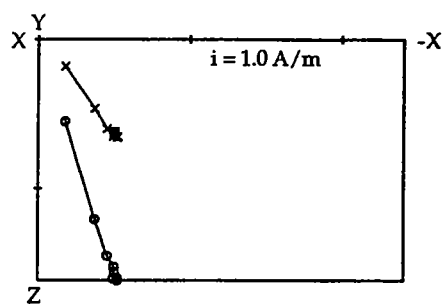


35288A-211T

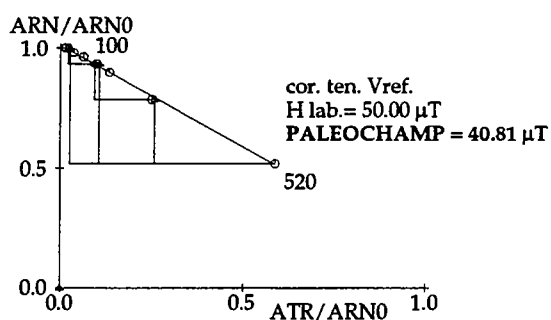
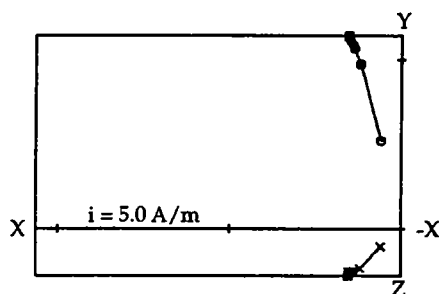




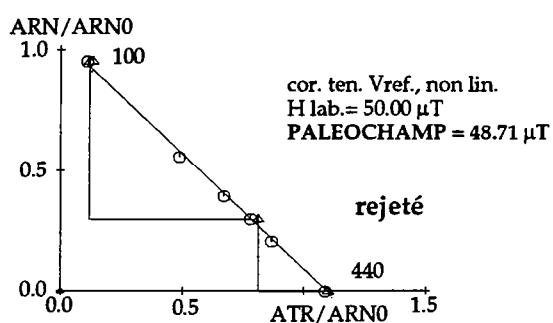
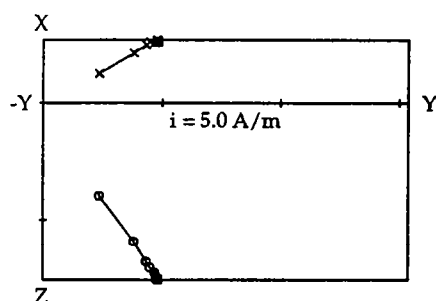
49127A-62B



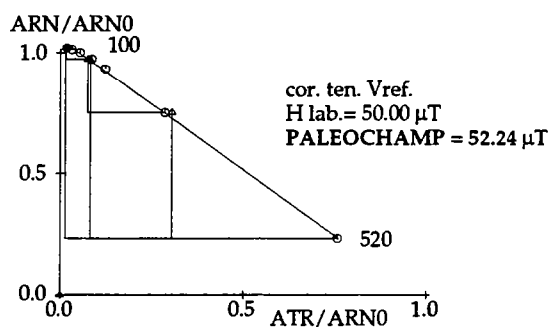
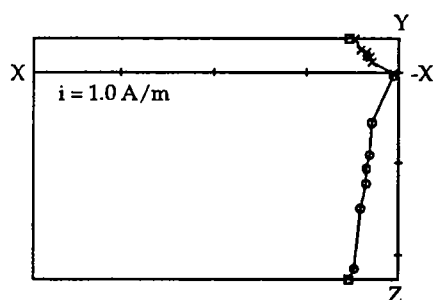
49127A-63B



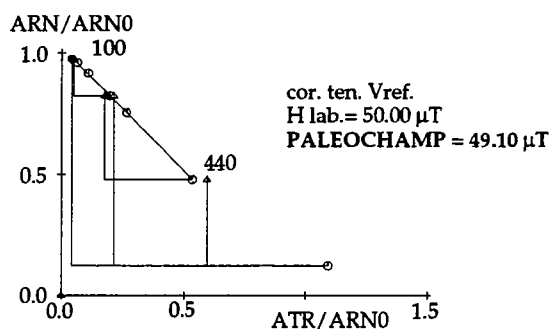
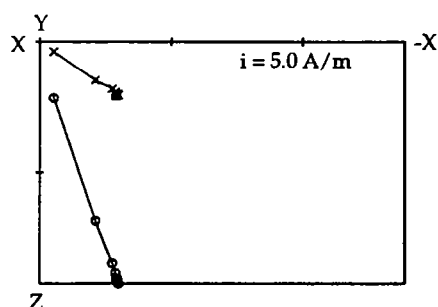
49127A-64B



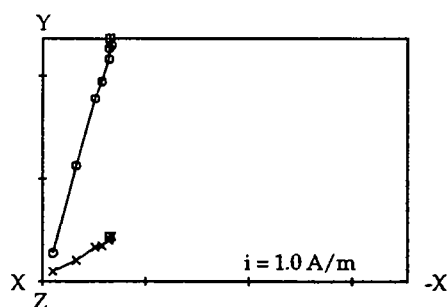
49127A-69B

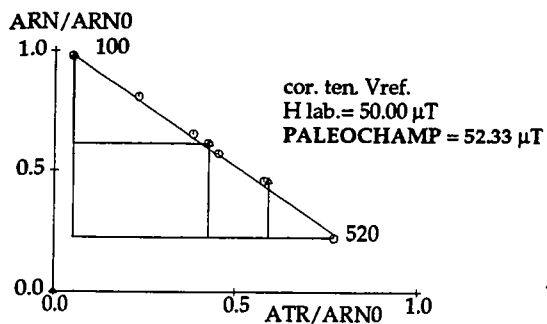


49127A-71B

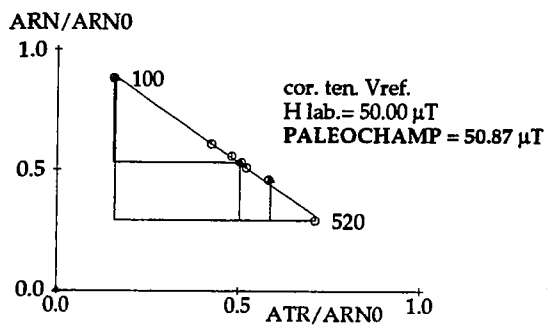
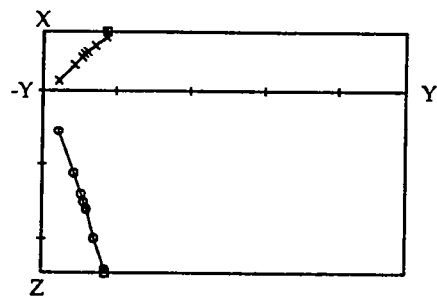


49127A-72B

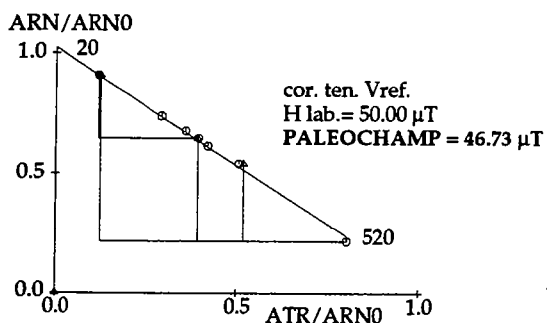
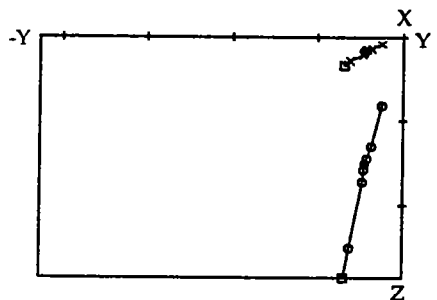




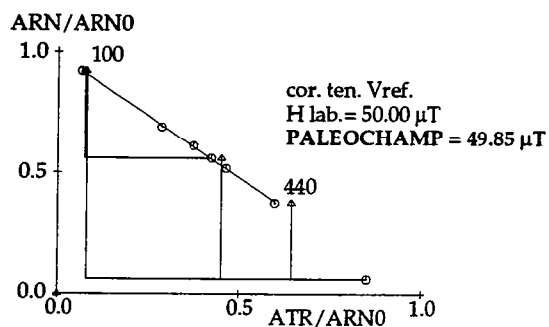
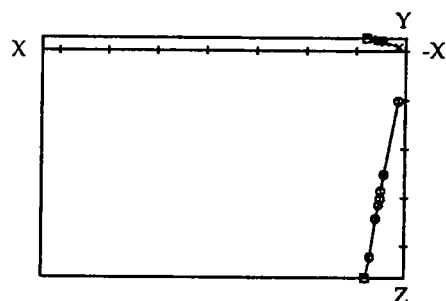
49127A-73B



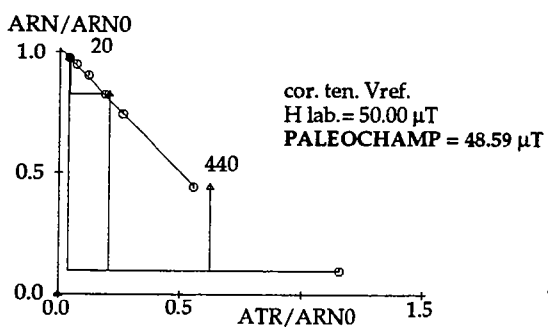
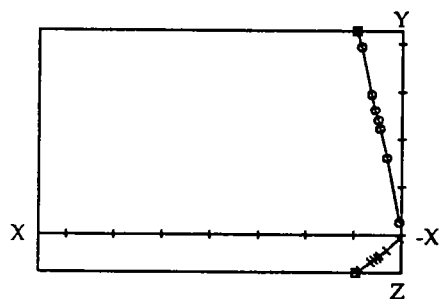
49127A-74B



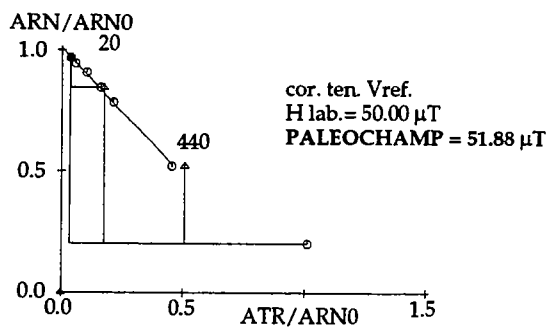
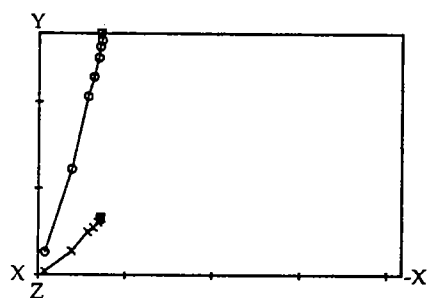
49127A-75B



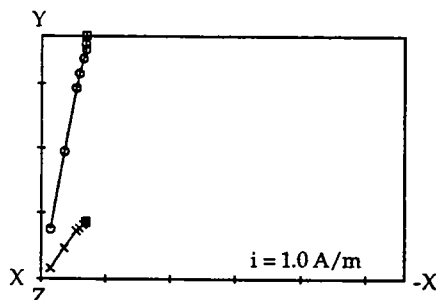
49127A-77B

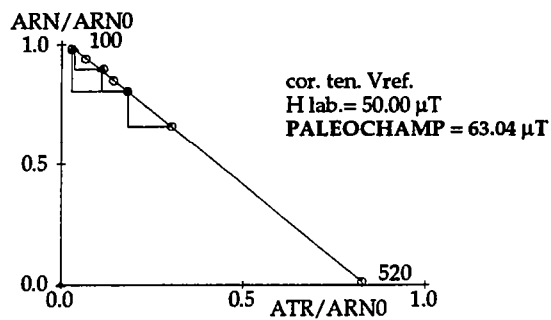


49127A-78B

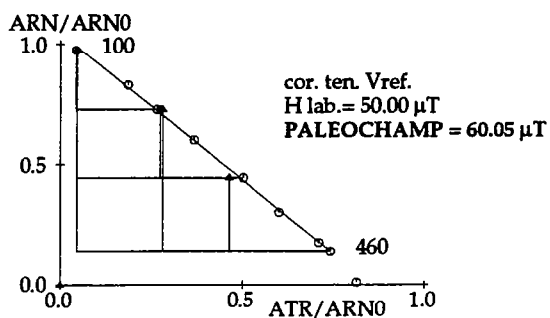
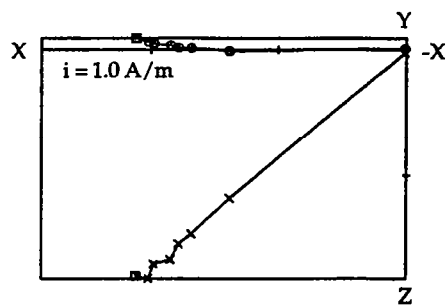


49127A-79B

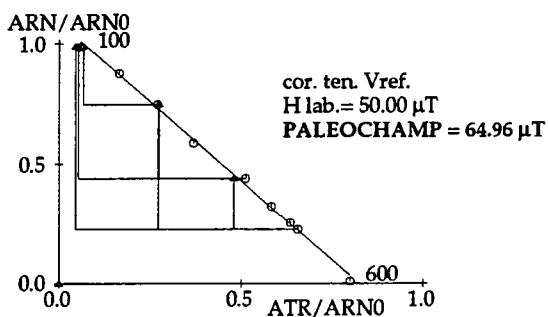
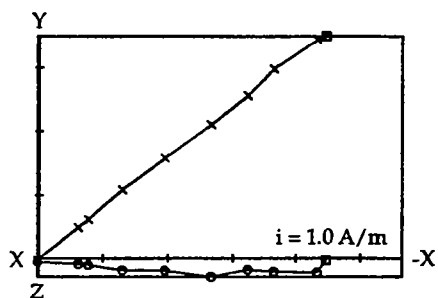




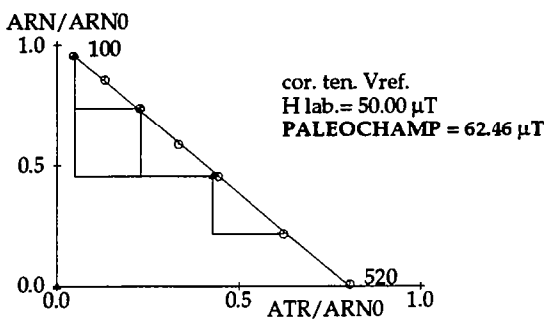
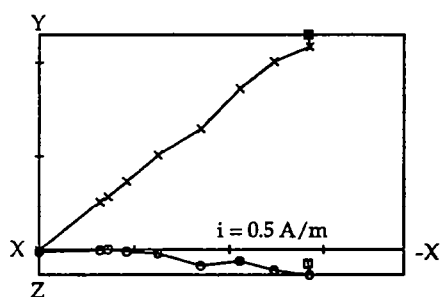
53169A-12T



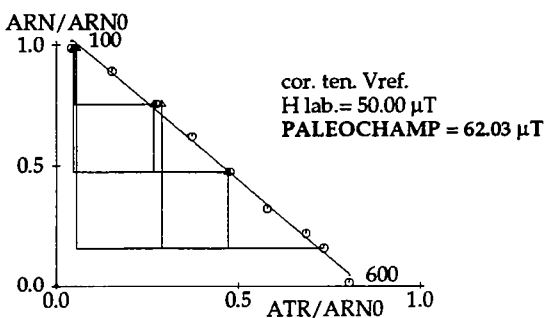
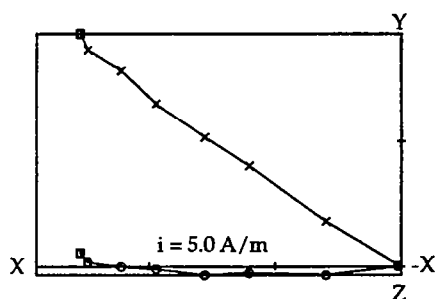
53169A-15T



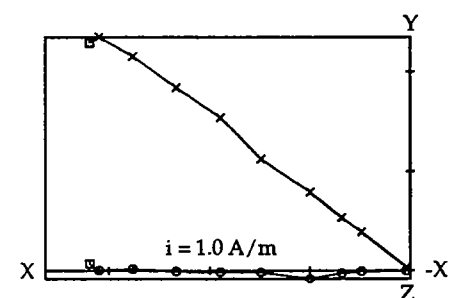
53169A-19T

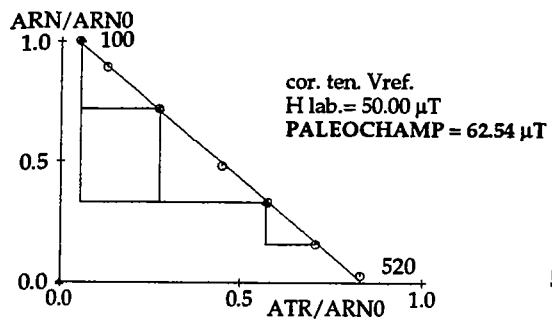


53169A-35T

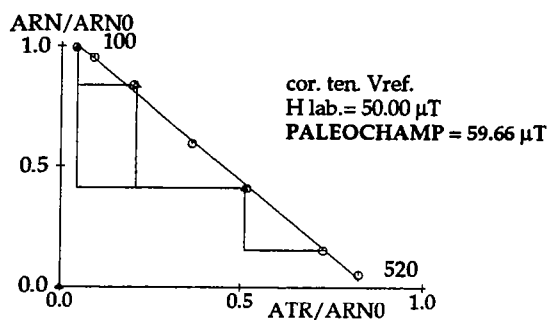
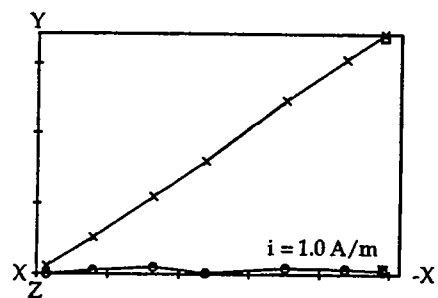


53169A-42T

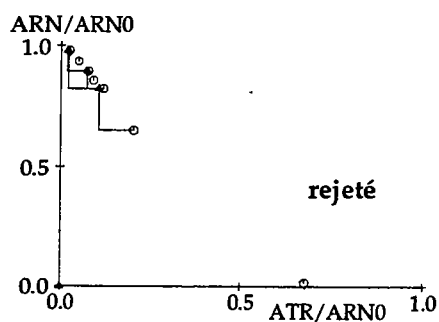
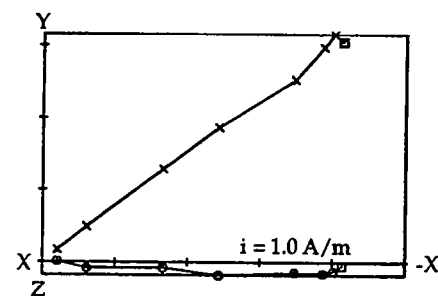




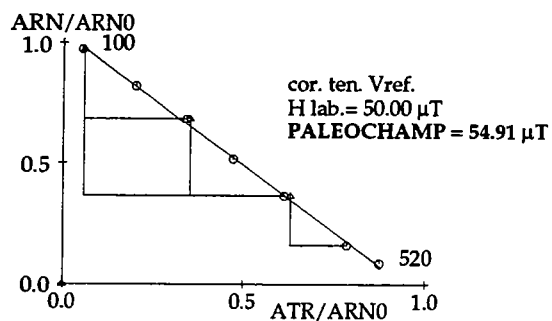
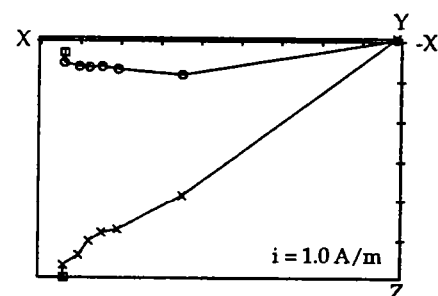
53169A-49T



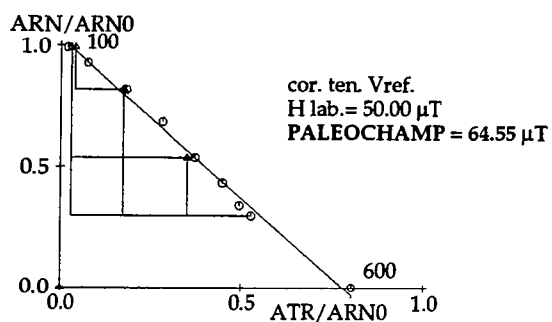
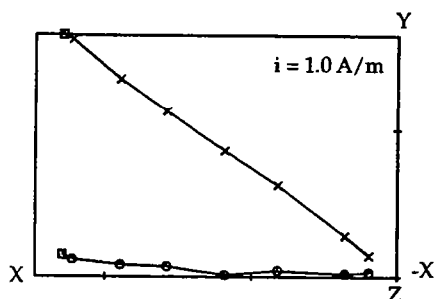
53169A-56T



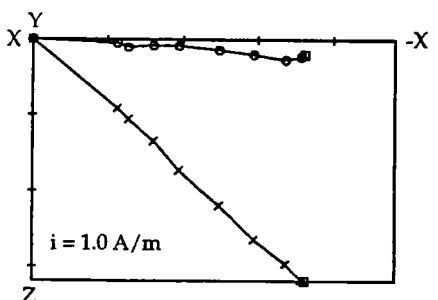
53169A-64T

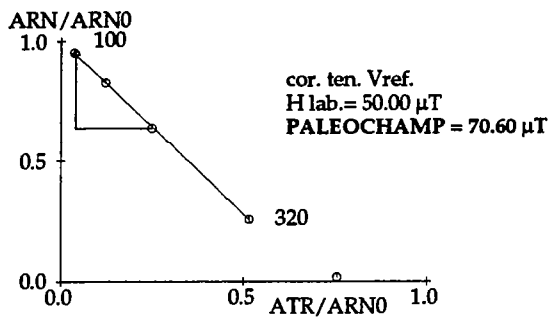


53169A-11S

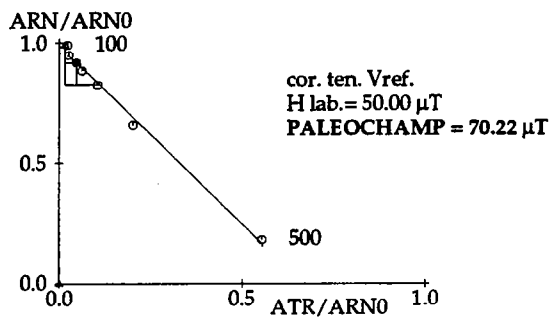
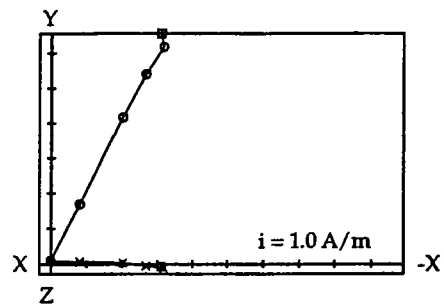


53169A-16S

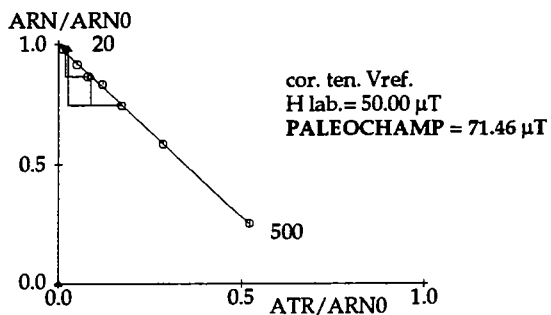
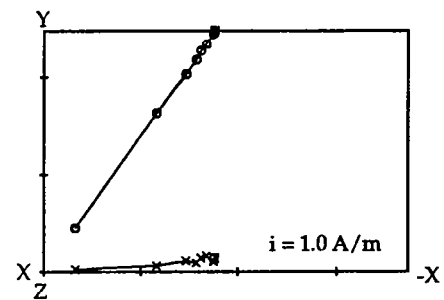




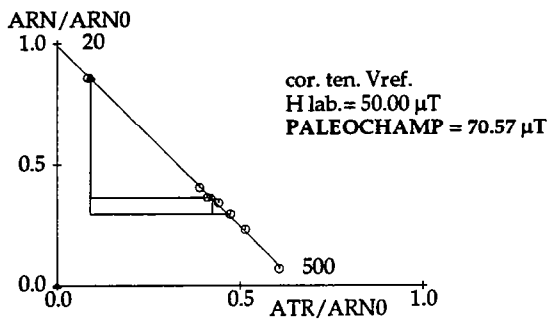
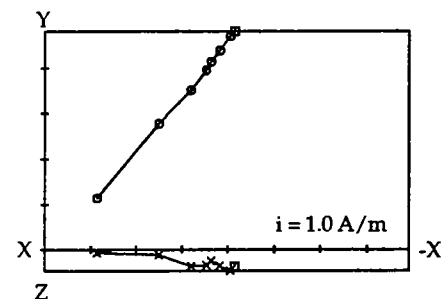
70LUX-F-2P



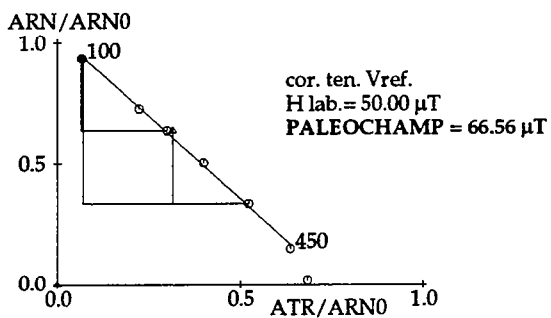
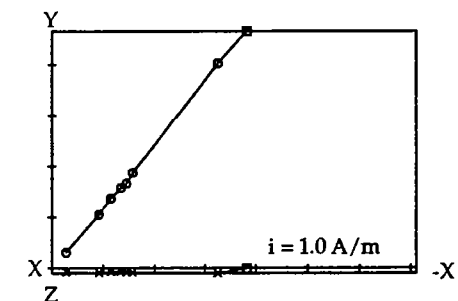
70LUX-F-5P



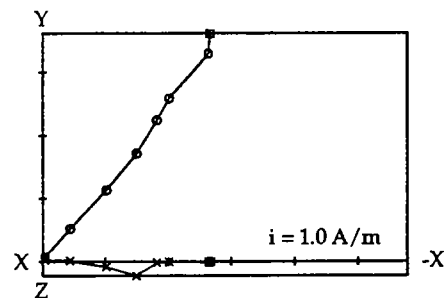
70LUX-F-9P

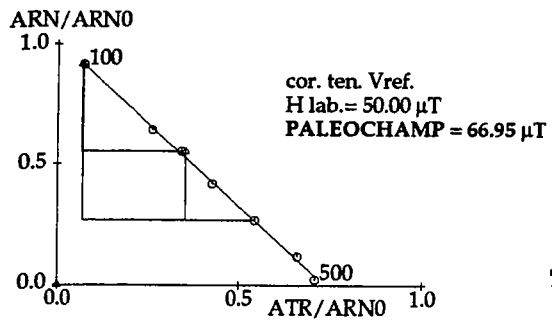


70LUX-F-10P

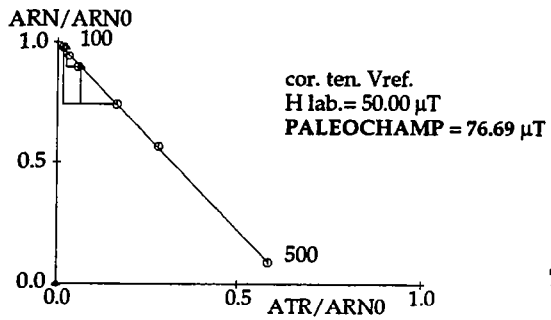
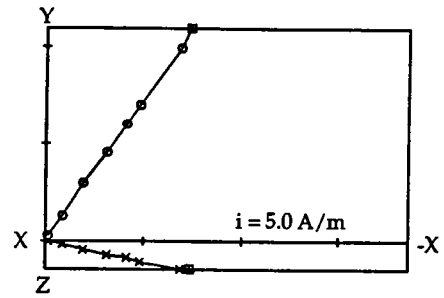


70LUX-F-12P

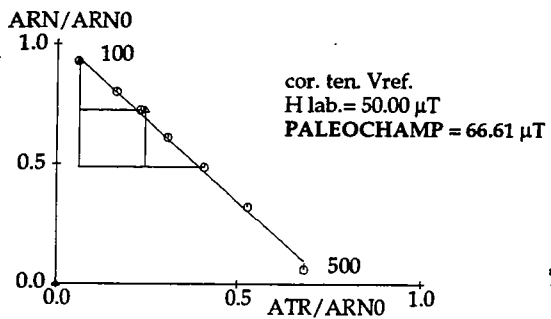
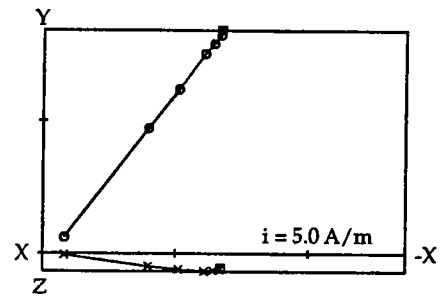




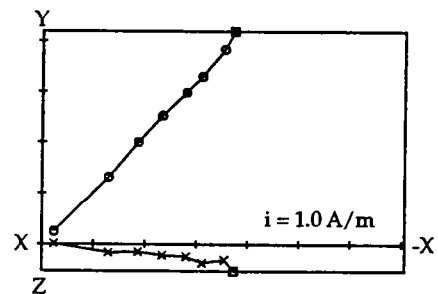
70LUX-F-13P

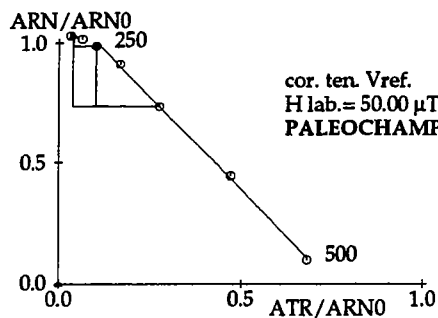


70LUX-F-15P

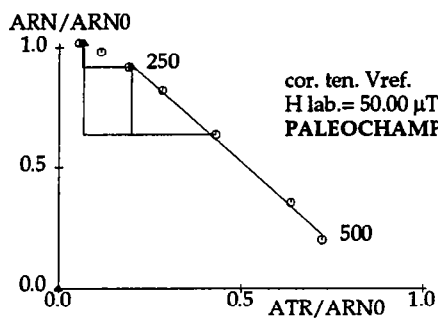
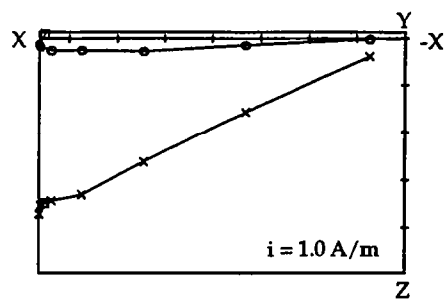


70LUX-F-19P

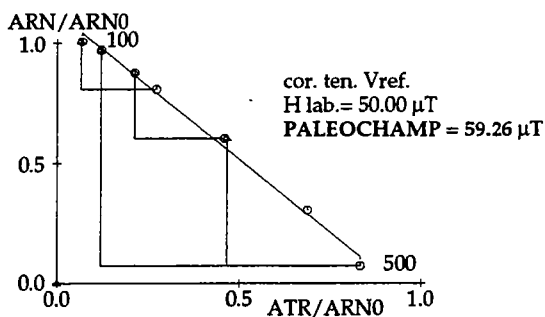
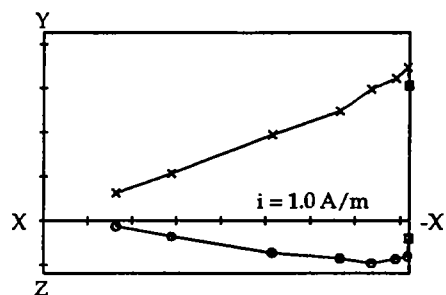




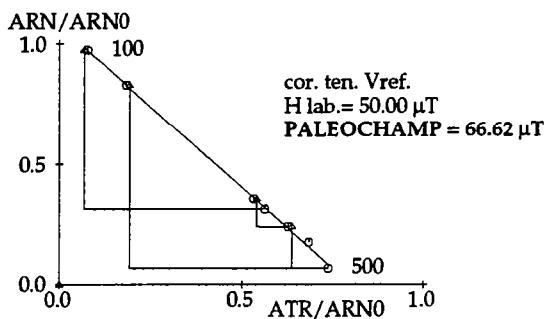
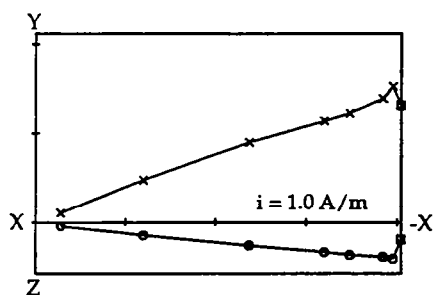
72225A-11T



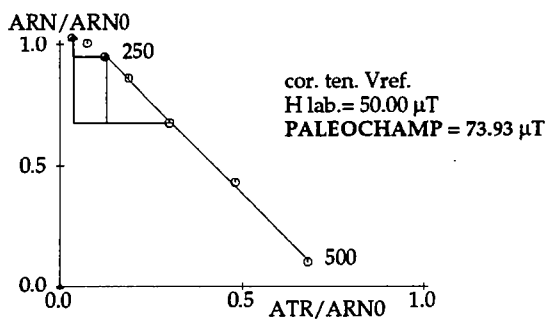
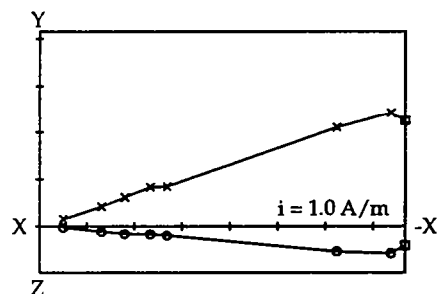
72225A-12T



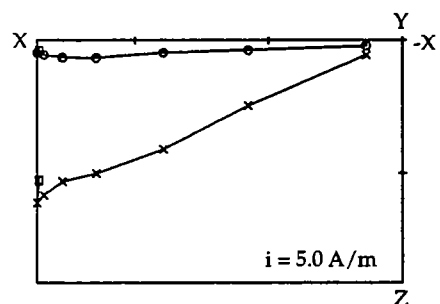
72225A-31T



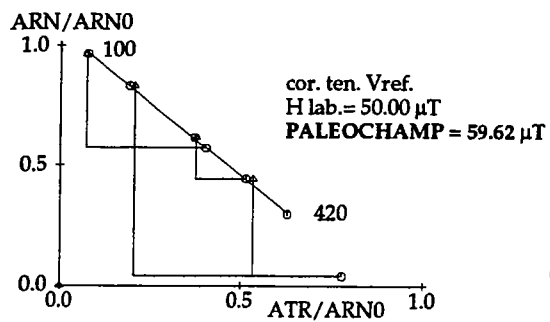
72225A-44T



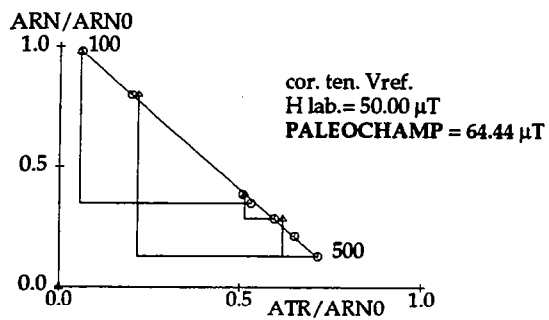
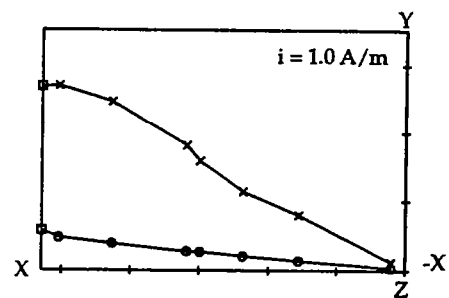
72225A-50T



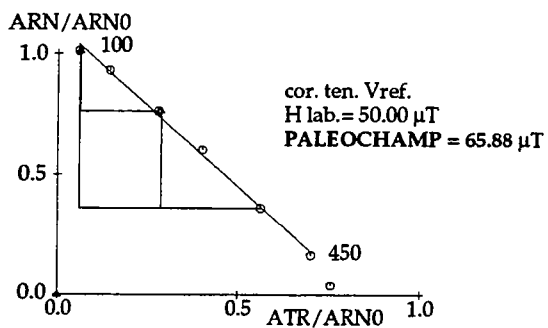
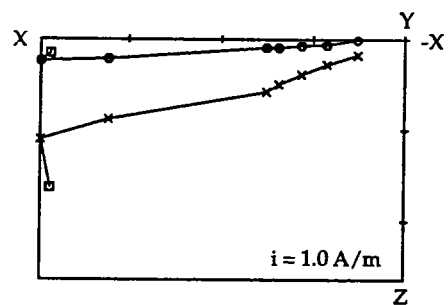




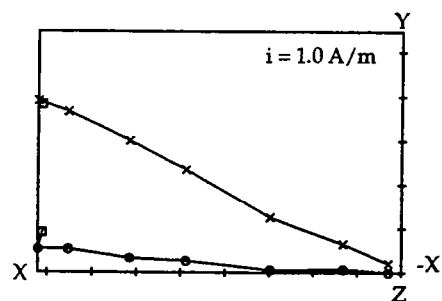
72225A-88T

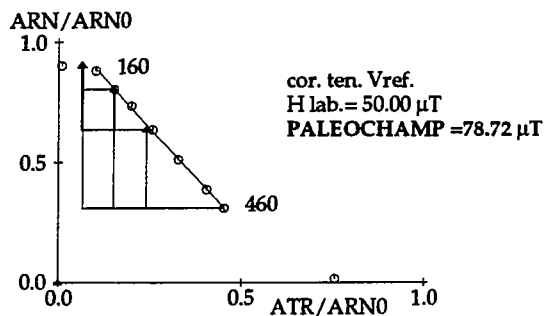


72225A-91T

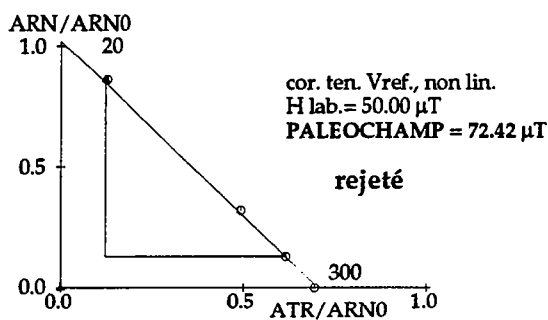
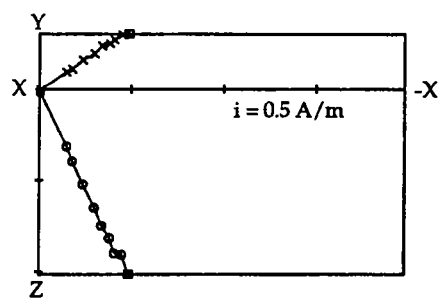


72225A-128T

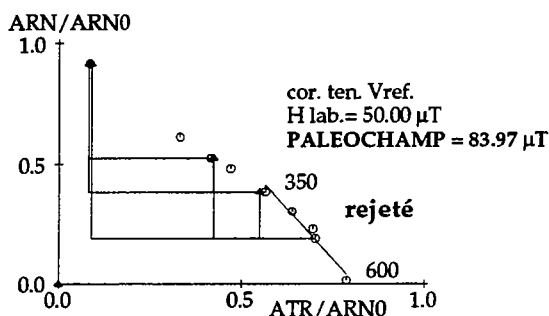
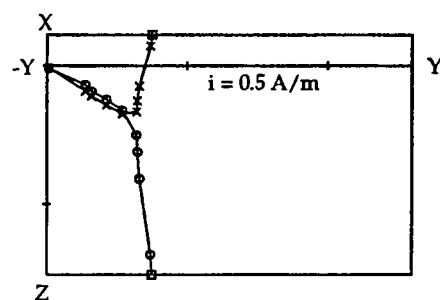




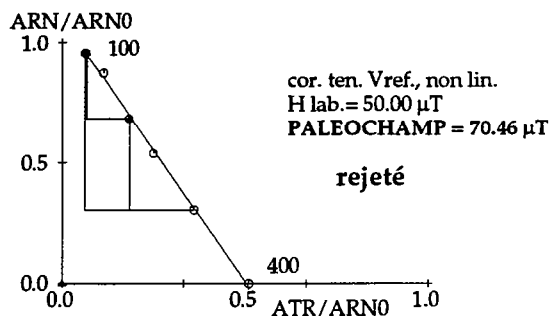
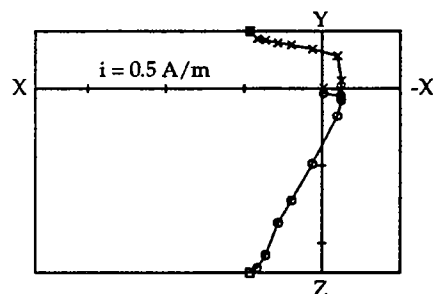
80035A-7P



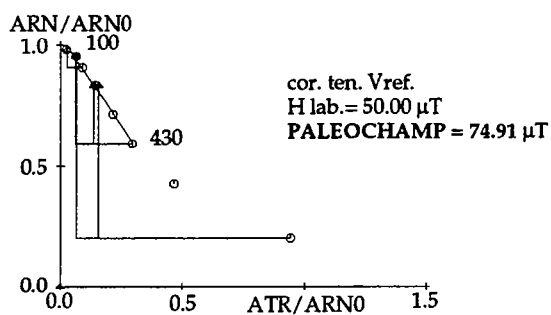
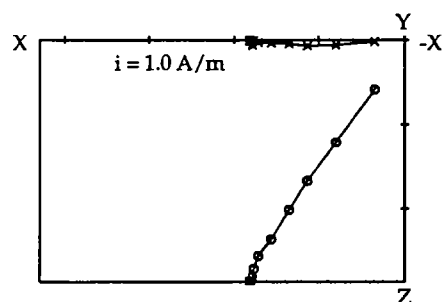
80035A-12P



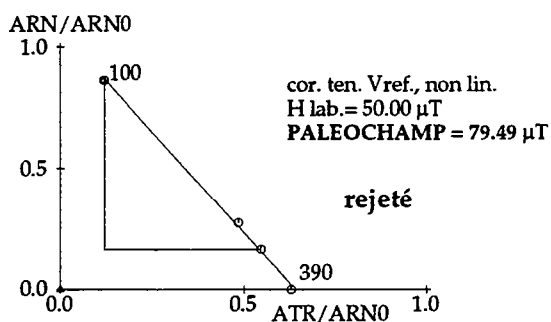
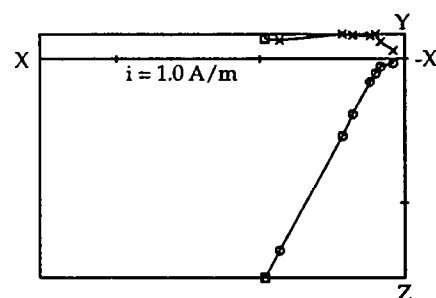
80035A-13P

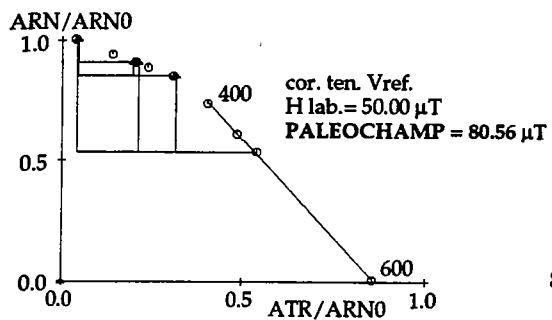


80035A-14P

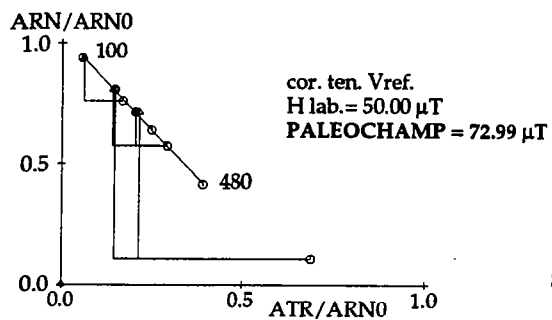
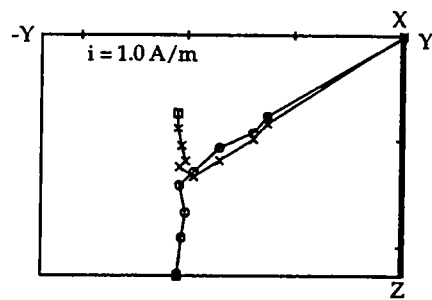


80035A-15P

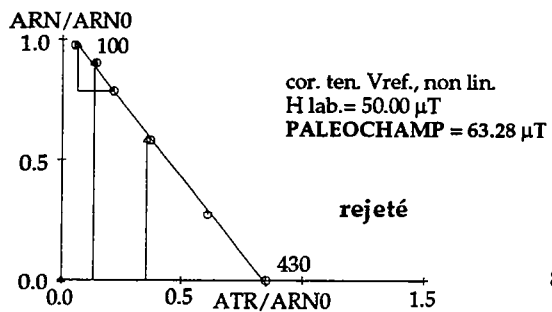
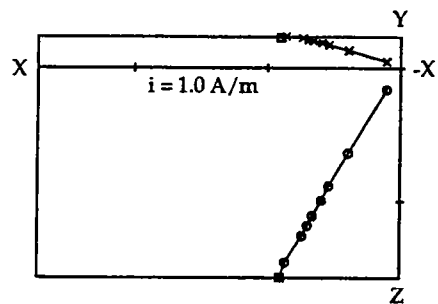




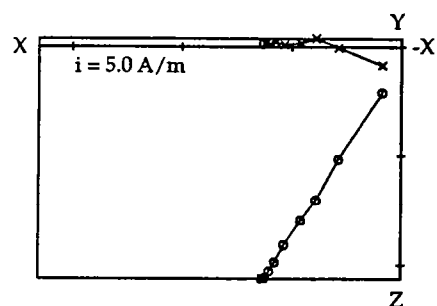
80035A-16P

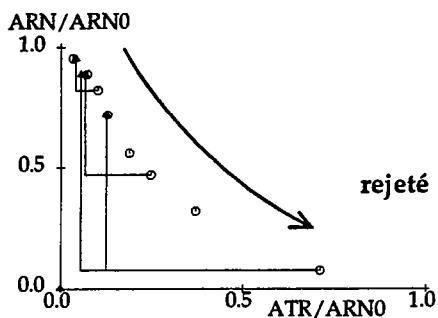


80035A-17P

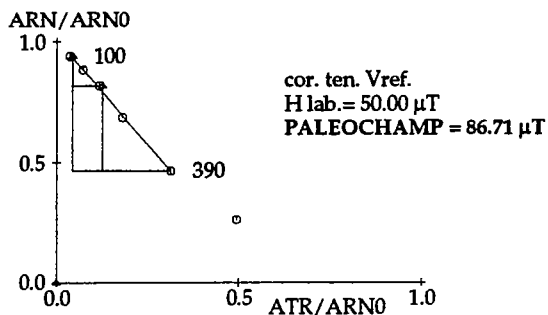
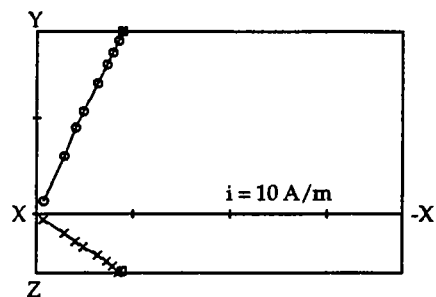


80035A-18P

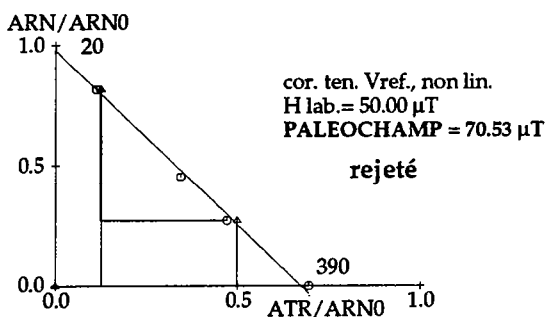
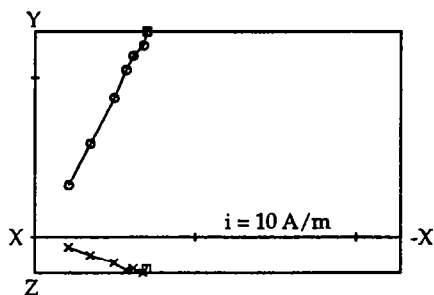




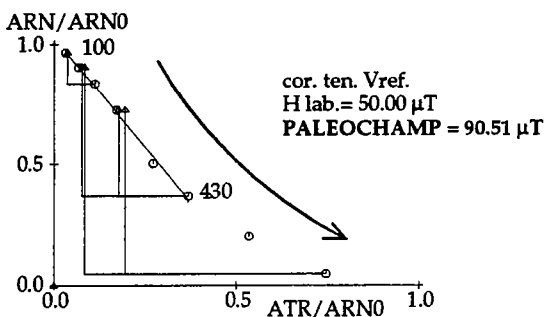
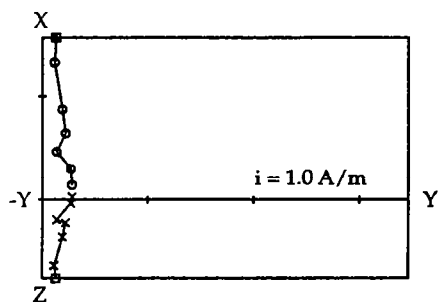
80035D-1P



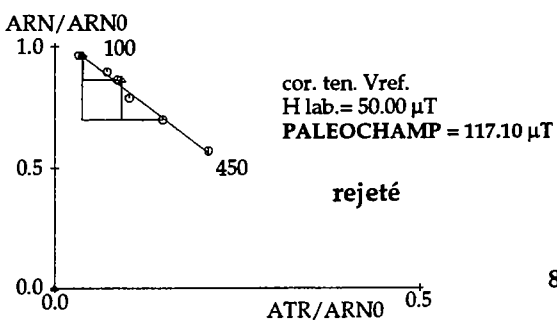
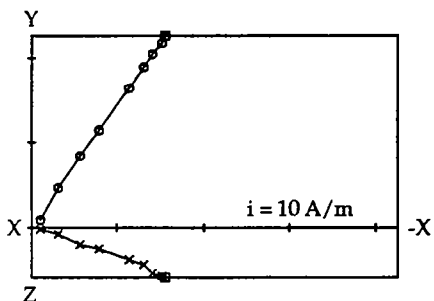
80035D-3P



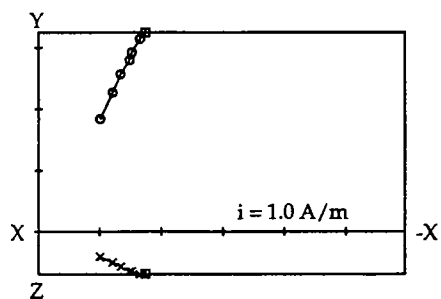
80035D-6P

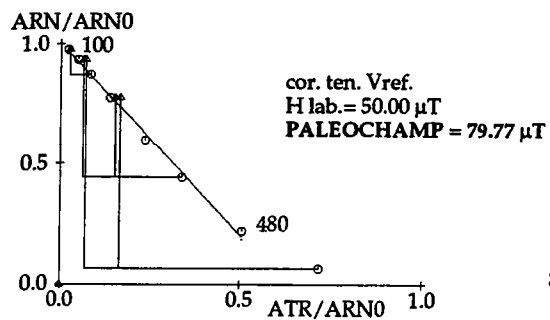


80035D-10P

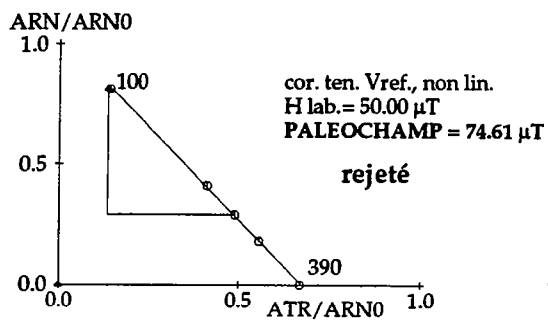
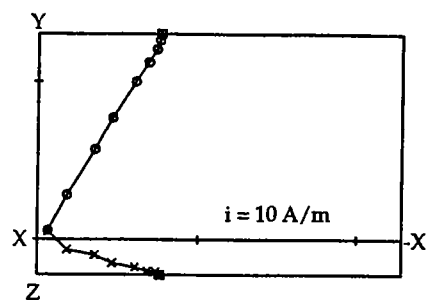


80035D-12P

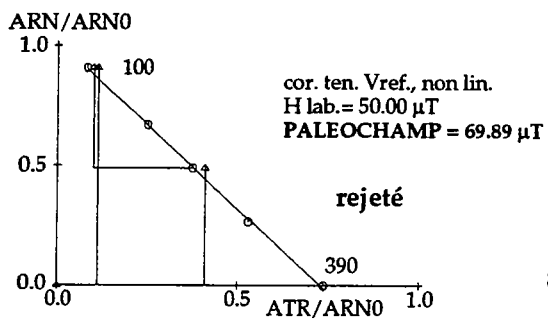
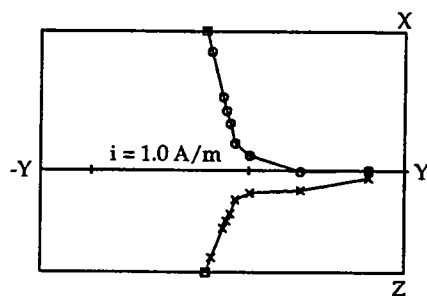




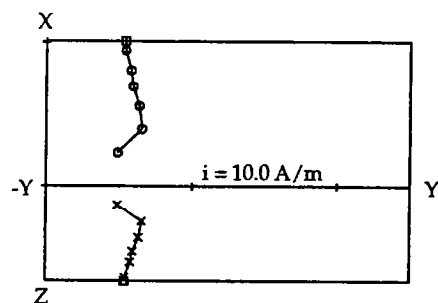
80035D-14P



80035D-15P



80035D-16P



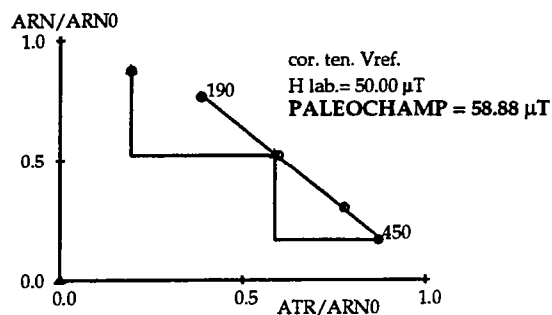


## Chapitre IV

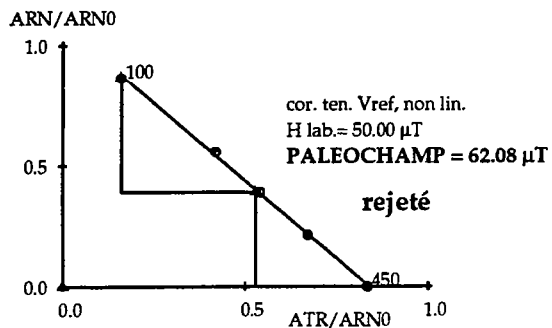
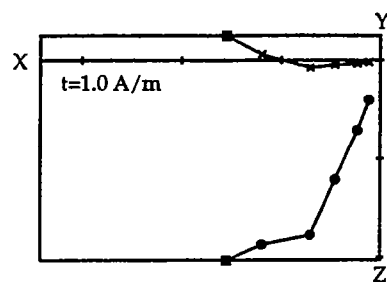
### "Etude d'archéointensité sur le site de Sallèles- d'Aude"

documents annexes :

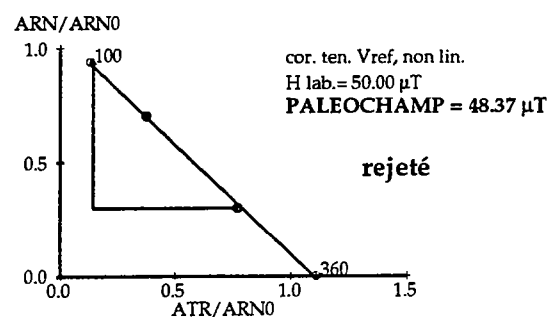
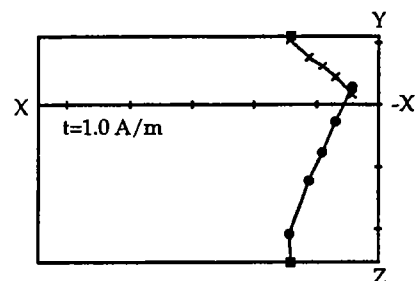
- diagrammes d'Araï et de Zijderveld  
des échantillons étudiés.



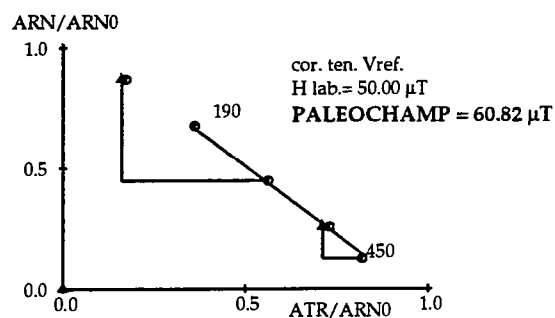
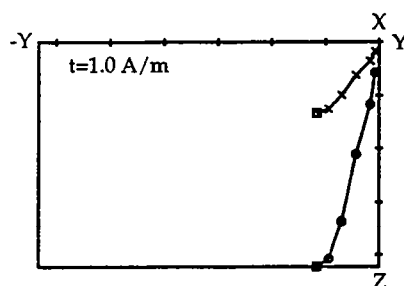
11sal-A7-15A



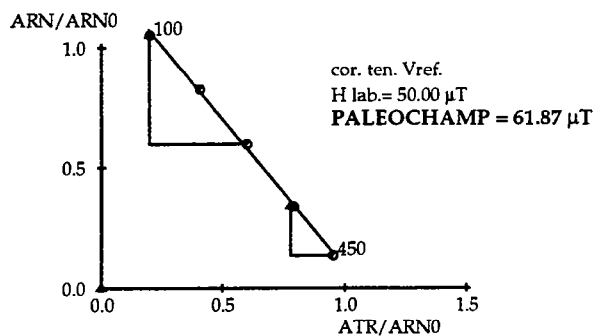
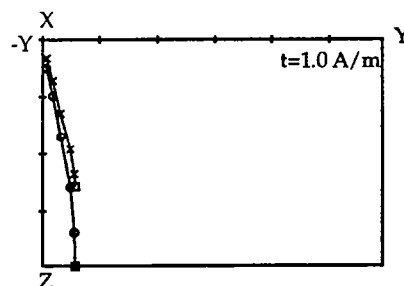
11sal-A7-24A



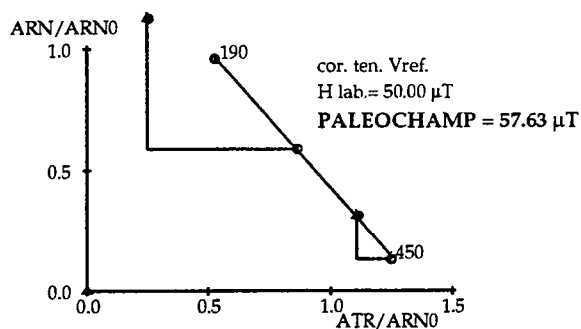
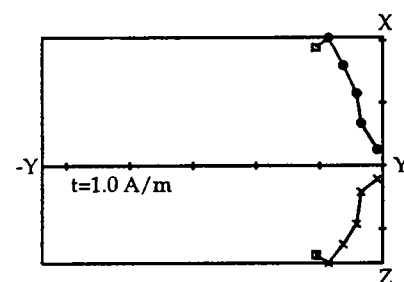
11sal-A7-26A



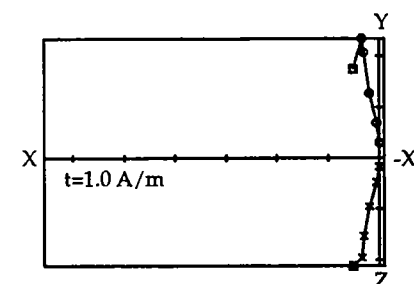
11sal-A7-33A



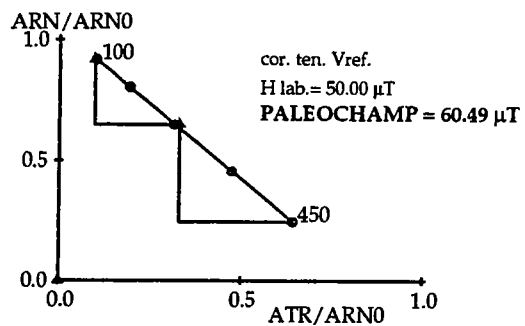
11sal-A7-42A



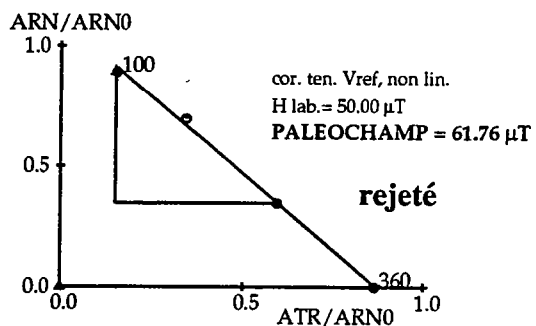
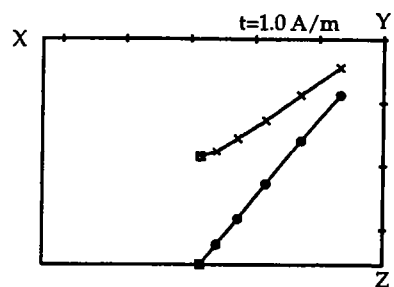
11sal-A7-49A



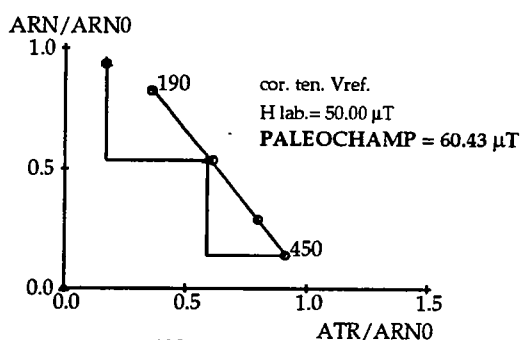
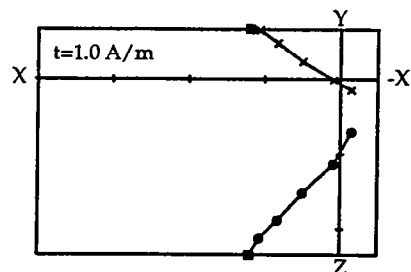




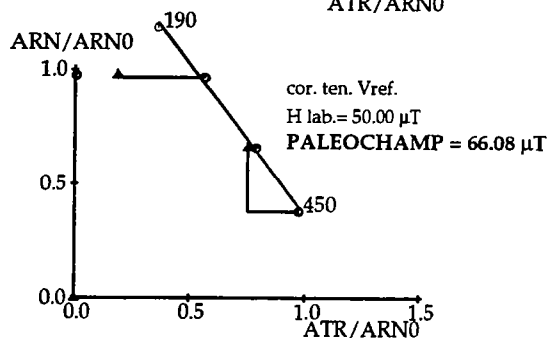
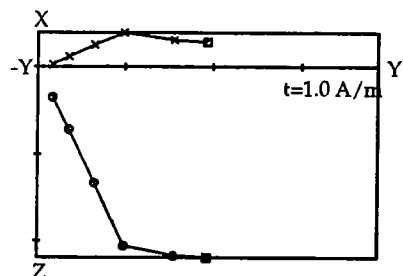
11sal-A7-16A



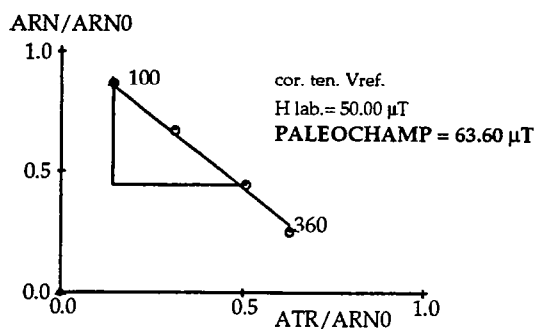
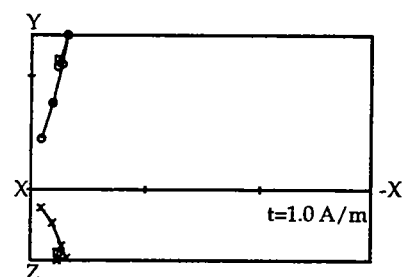
11sal-A7-25A



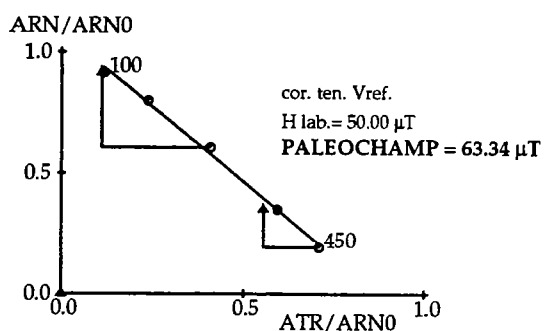
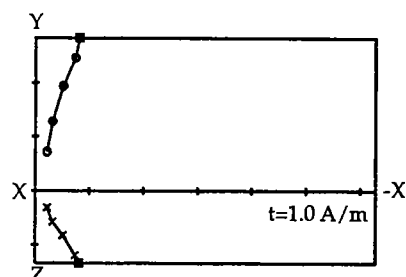
11sal-A7-30A



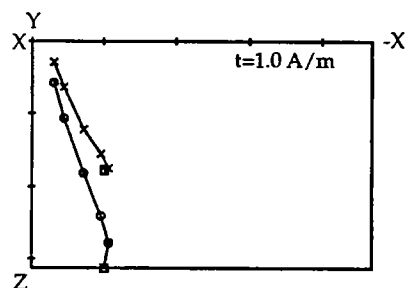
11sal-A7-37A

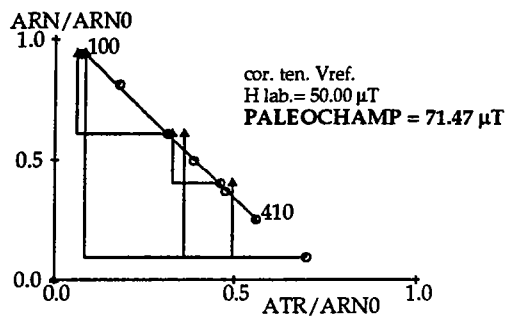


11sal-A7-48A

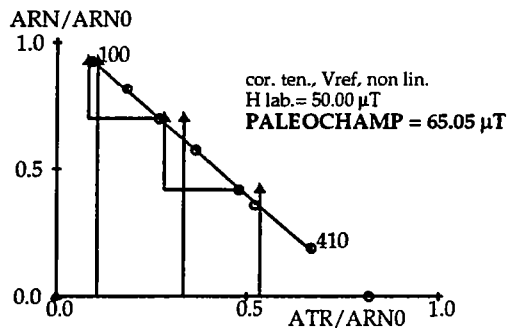
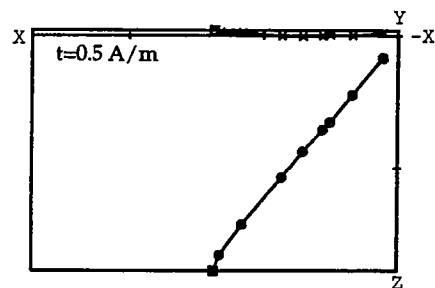


11sal-A7-51A

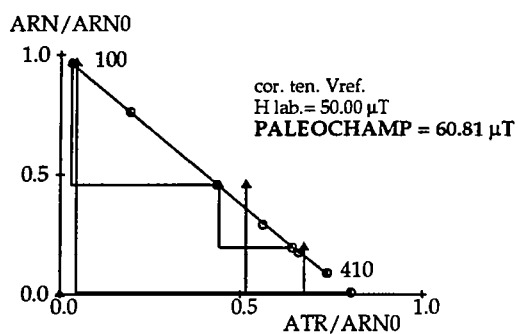
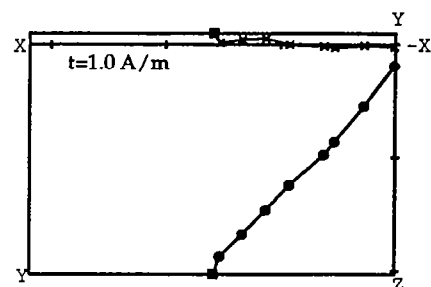




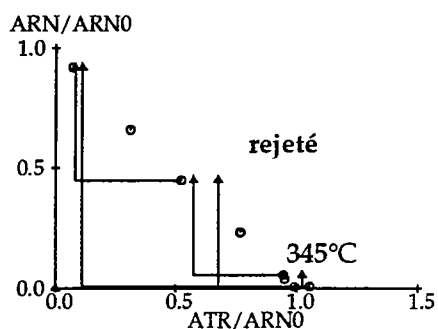
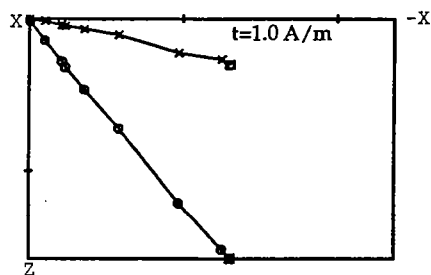
11salf3-1P



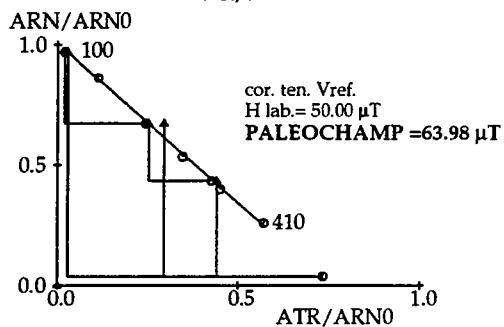
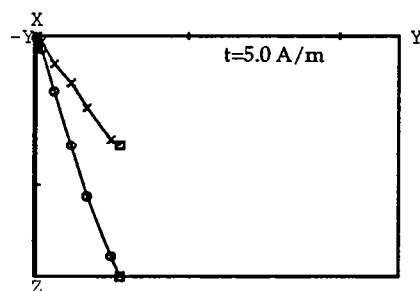
11salf3-3P



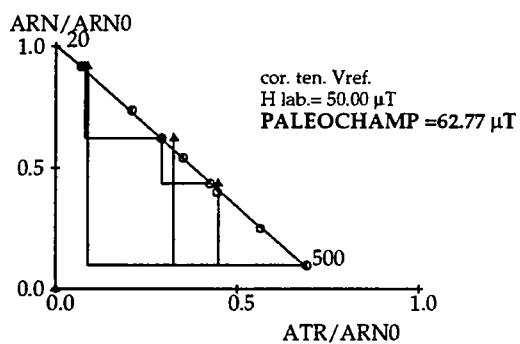
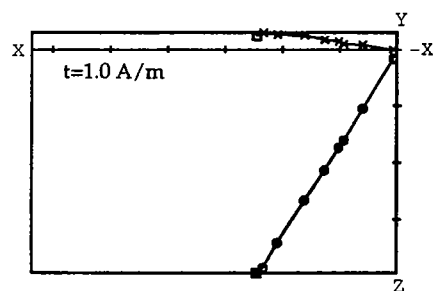
11salf3-5P



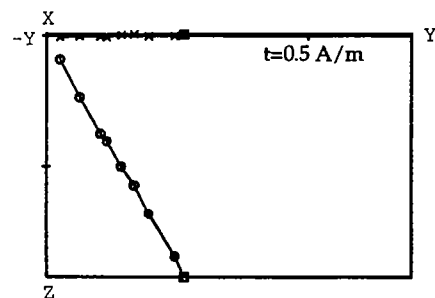
11salf3-7P

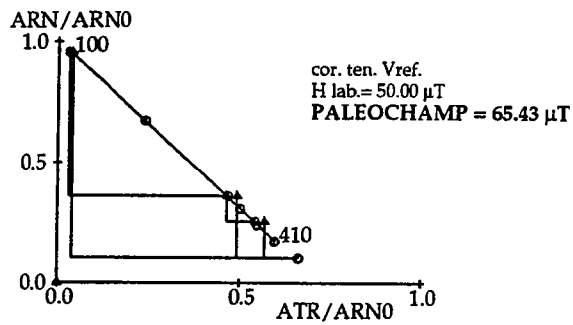


11salf3-8PA

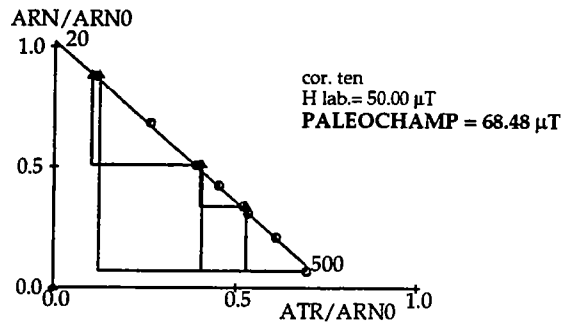
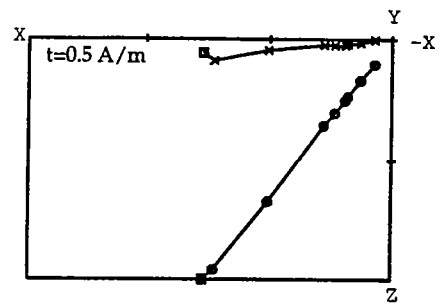


11salf3-10P

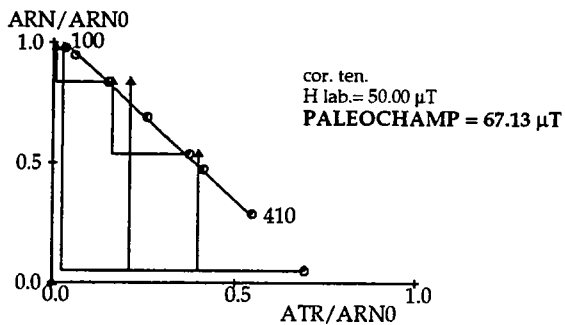
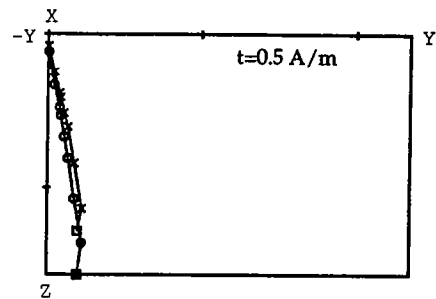




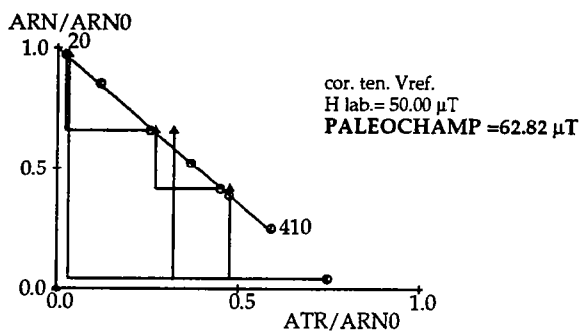
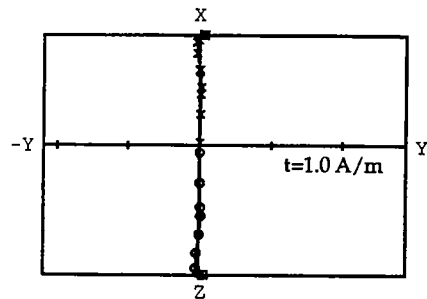
11salf3-2P



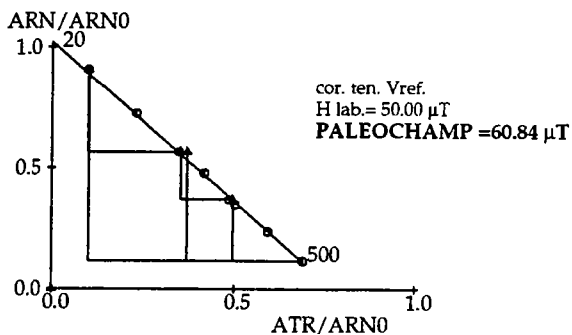
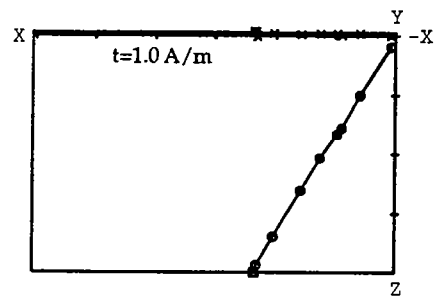
11salf3-4P



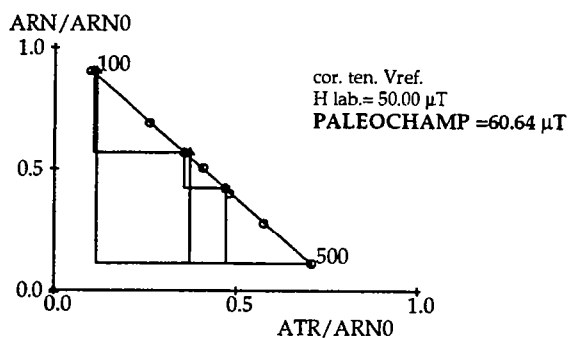
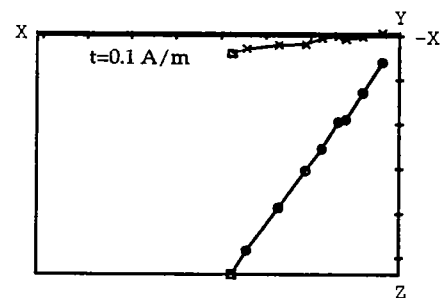
11salf3-6P



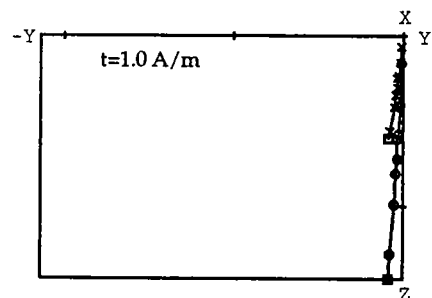
11salf3-8P

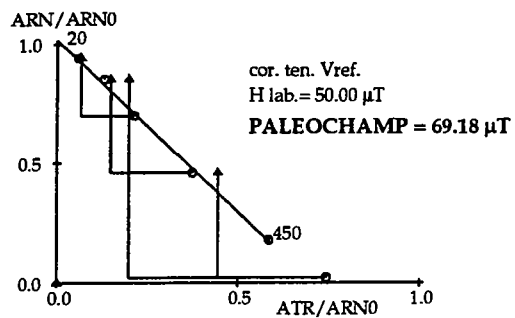


11salf3-9P

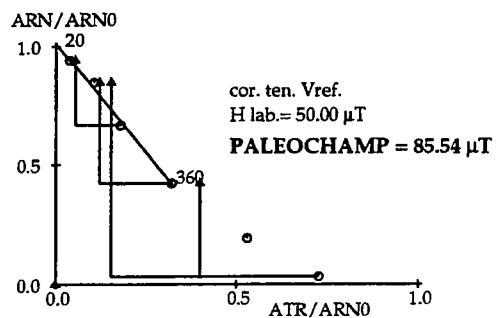
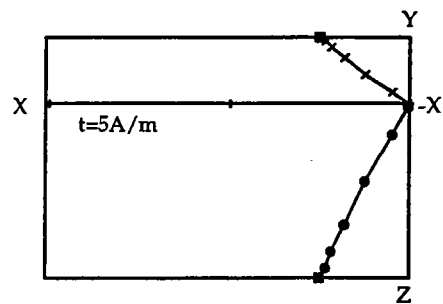


11salf3-11P

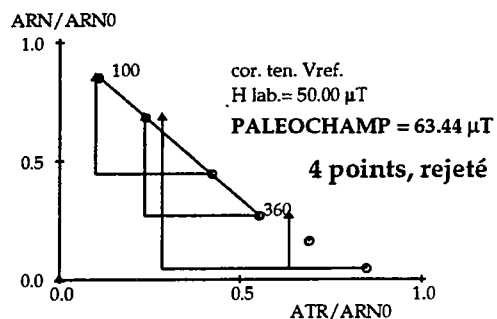
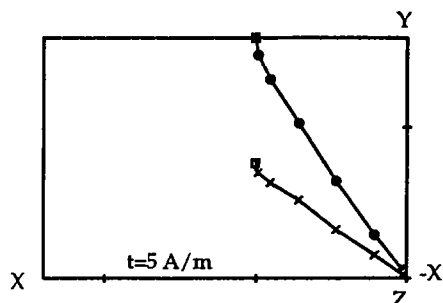




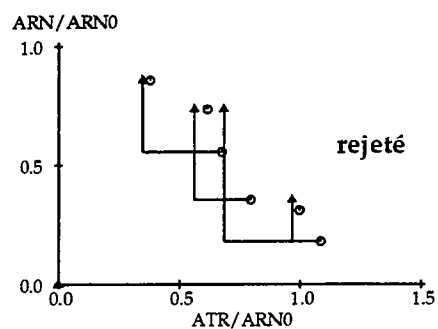
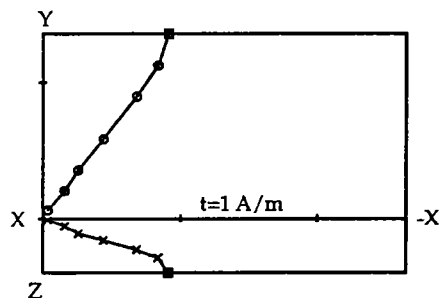
11salf7-1P0



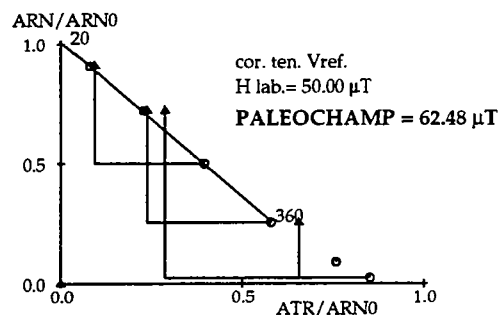
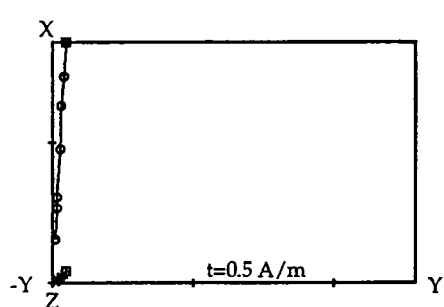
11salf7-2P0



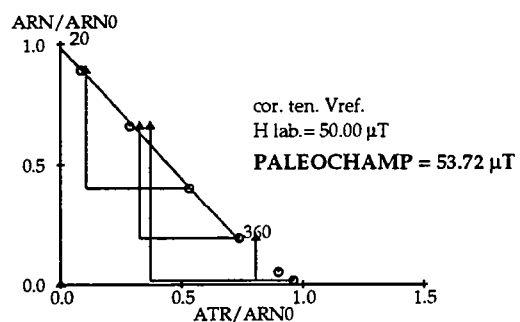
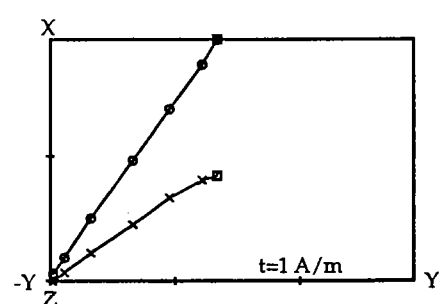
11salf7-3P2



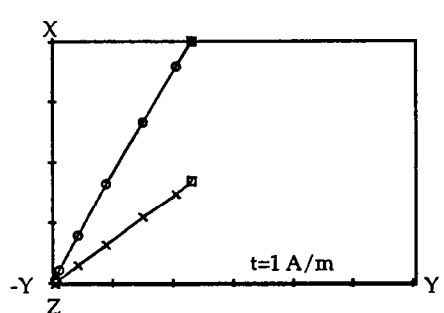
11salf7-7P1

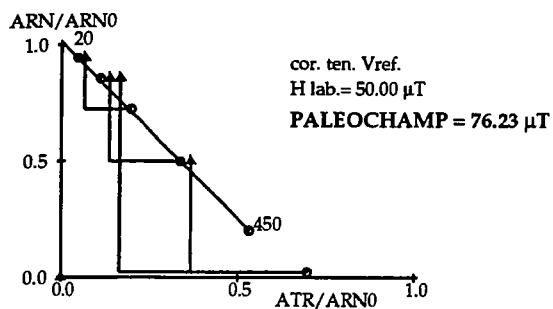


11salf7-9P0

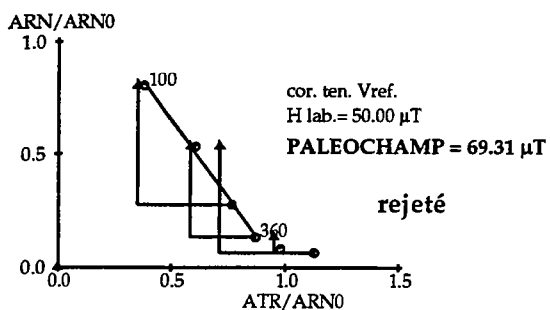
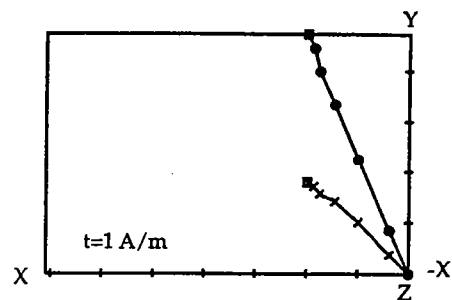


11salf7-10P1

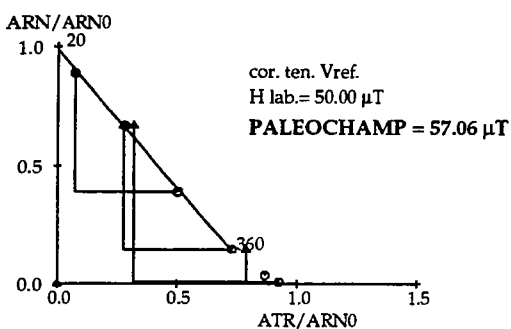
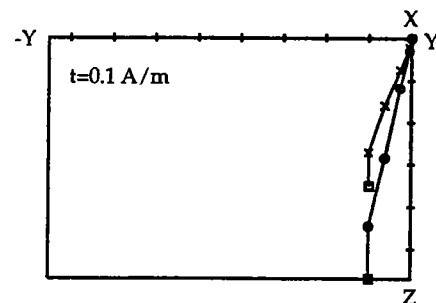




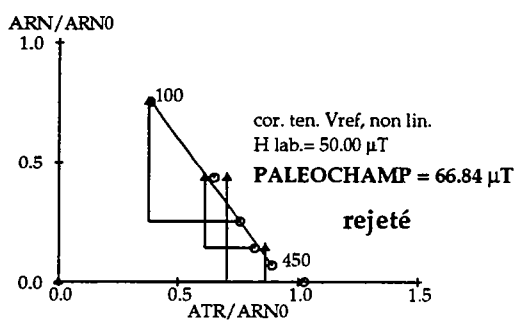
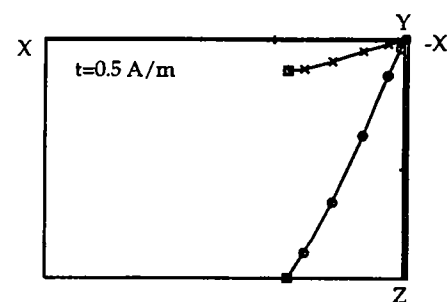
11salf7-1P1



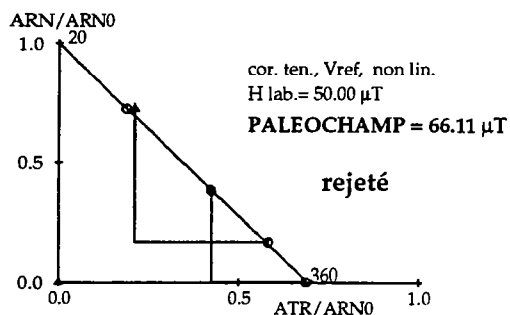
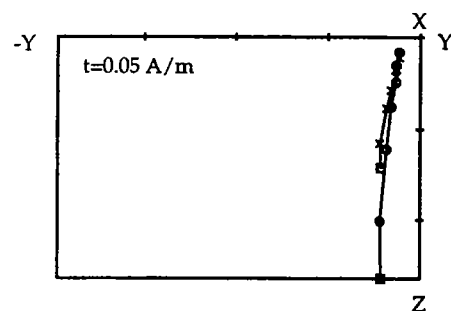
11salf7-2P1



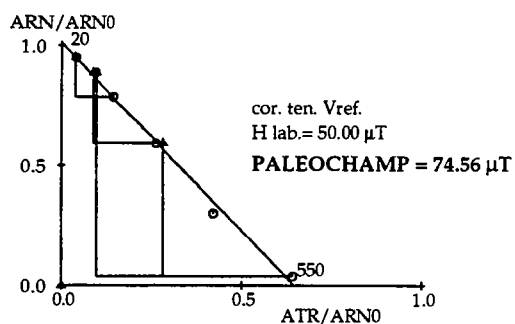
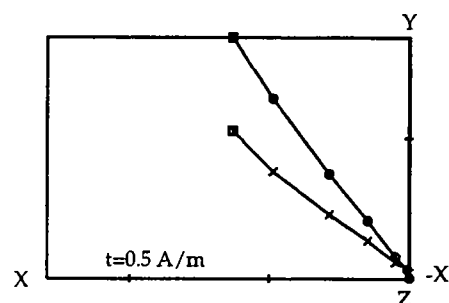
11salf7-5P0



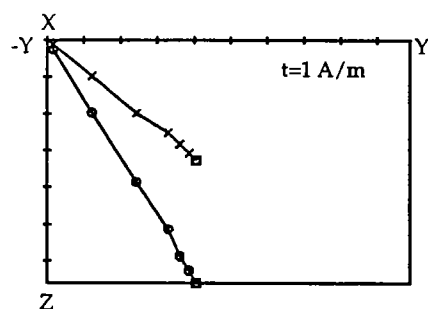
11salf7-7P2

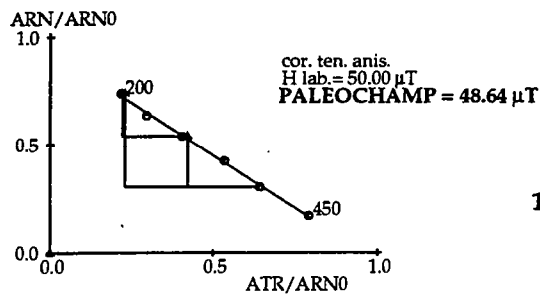


11salf7-9P1

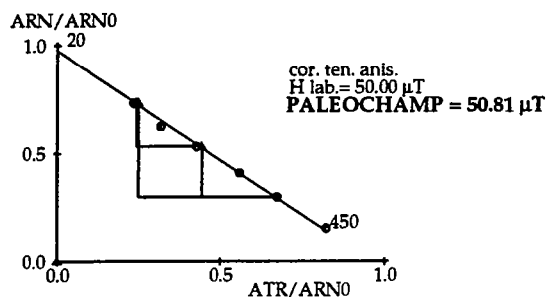
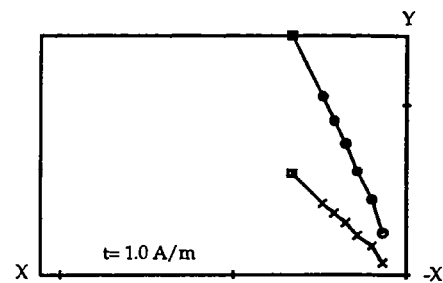


11salf7-15P0

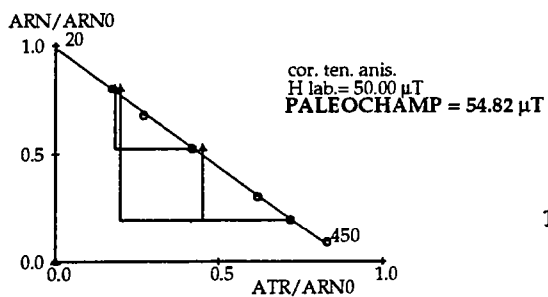
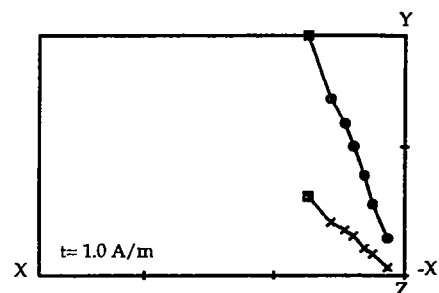




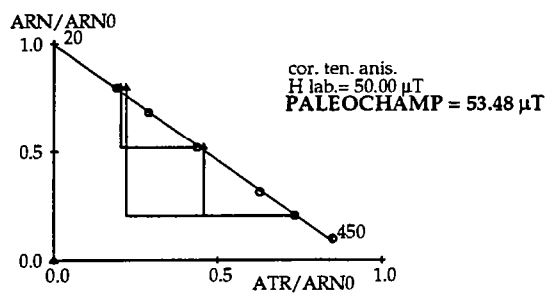
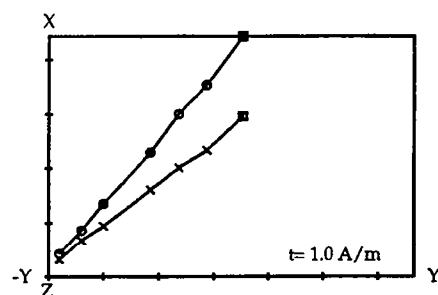
11salf7-6P3



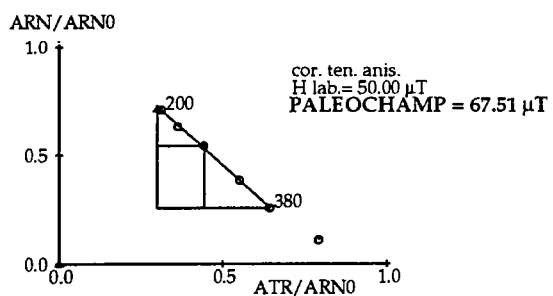
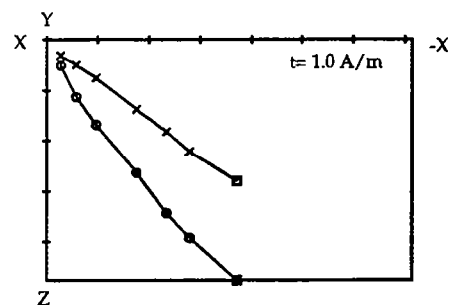
11salf7-6P5



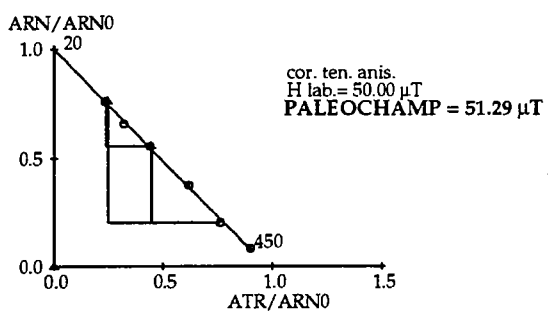
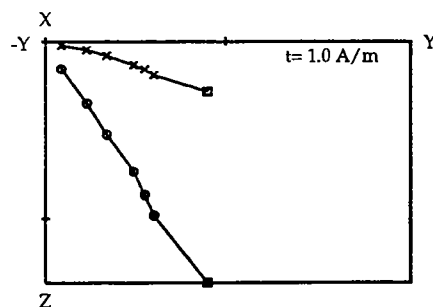
11salf7-8P2



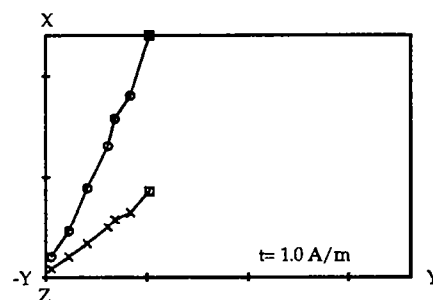
11salf7-8P4

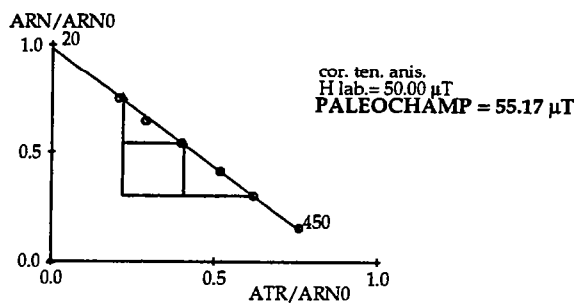


11salf7-12P1

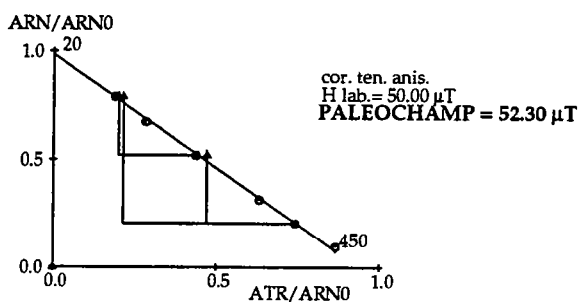
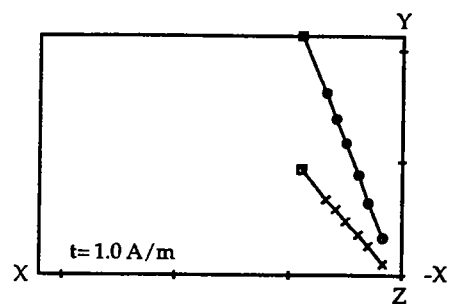


11salf7-14P1

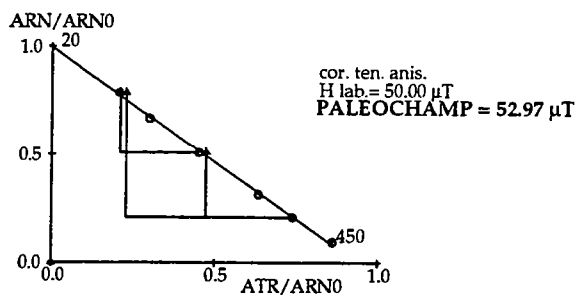
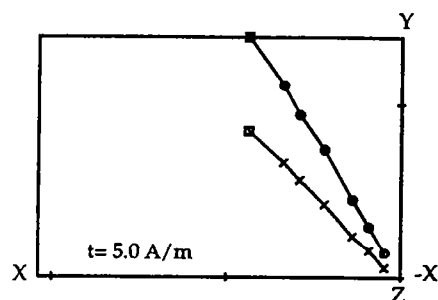




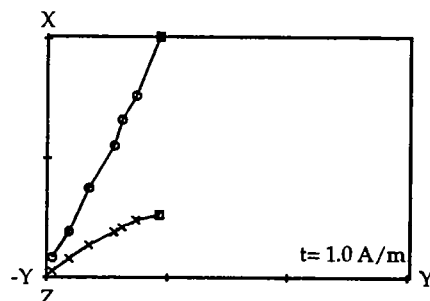
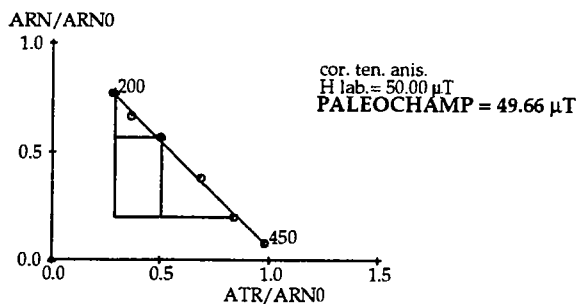
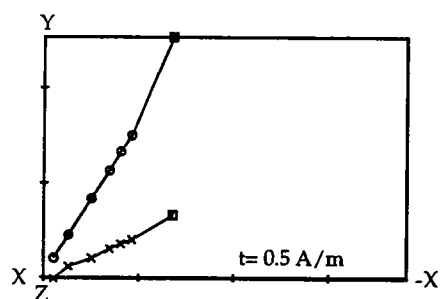
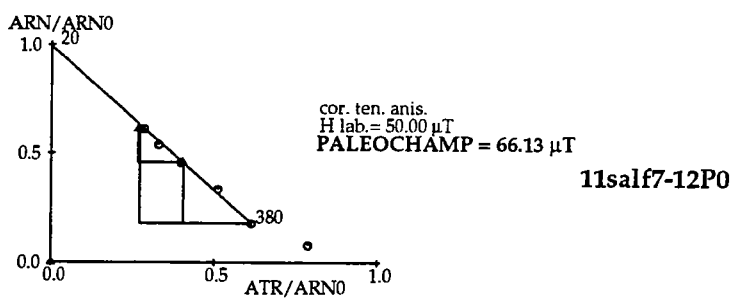
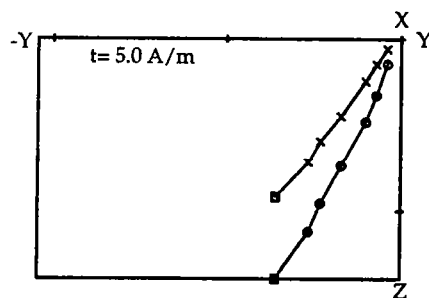
11salf7-6P4

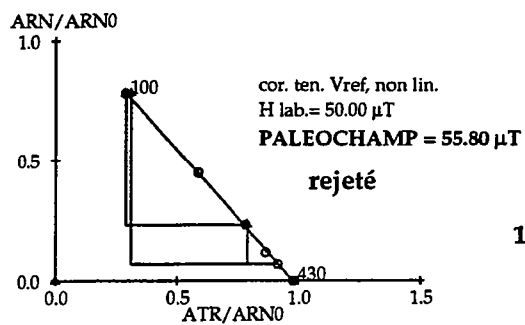


11salf7-8P0

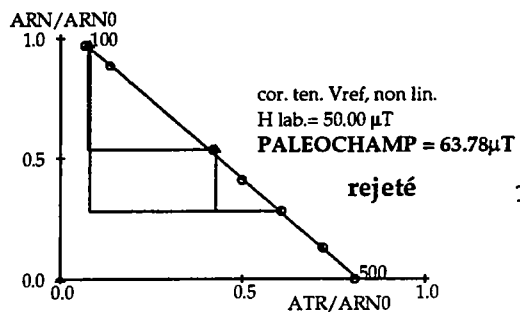
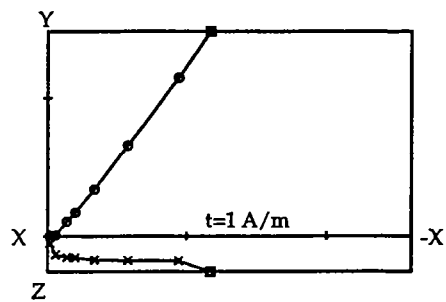


11salf7-8P3

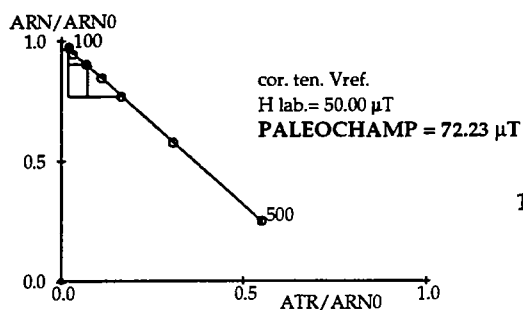
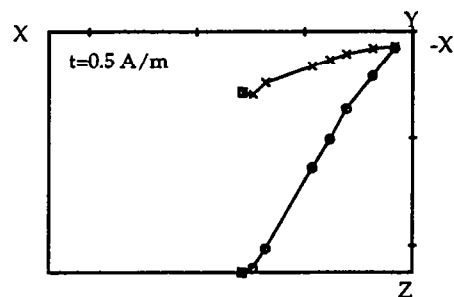




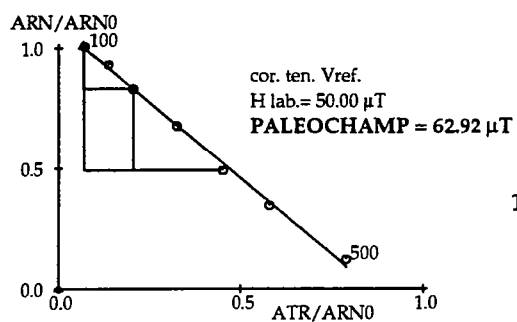
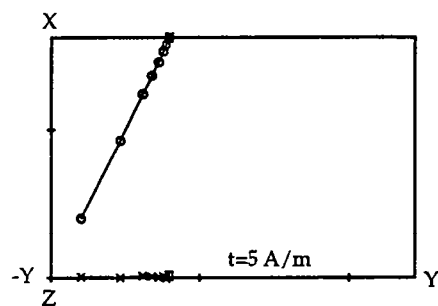
11salf8-1P2



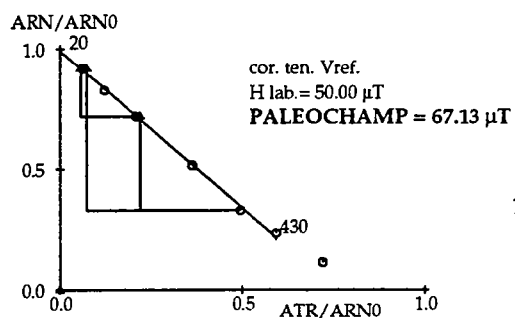
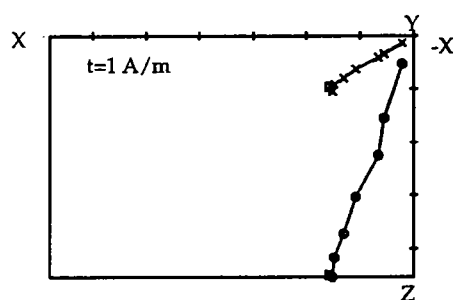
11salf8-2P2



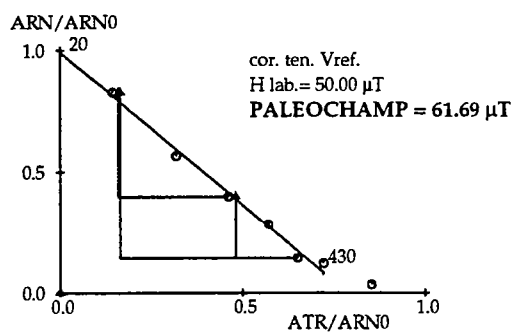
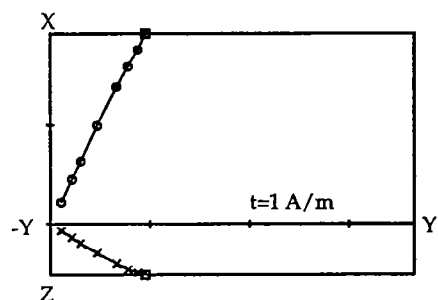
11salf8-3P1B



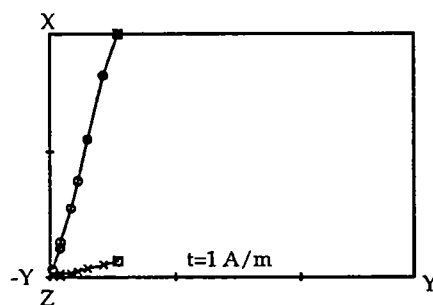
11salf8-5P1



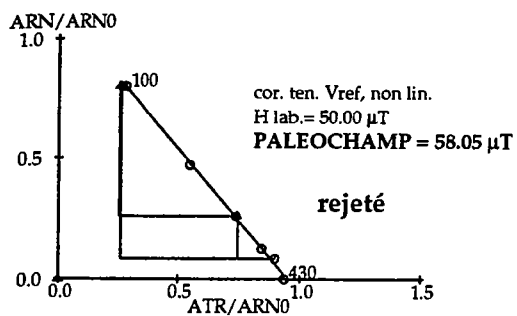
11salf8-10P2



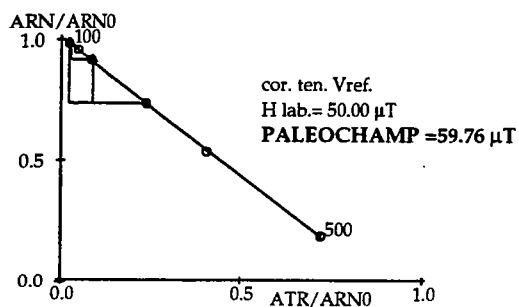
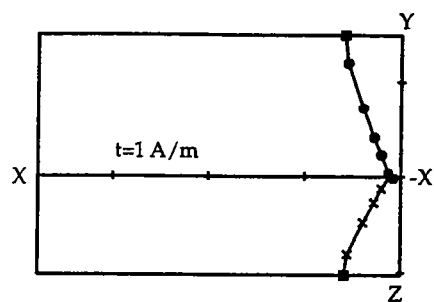
11salf8-13P2



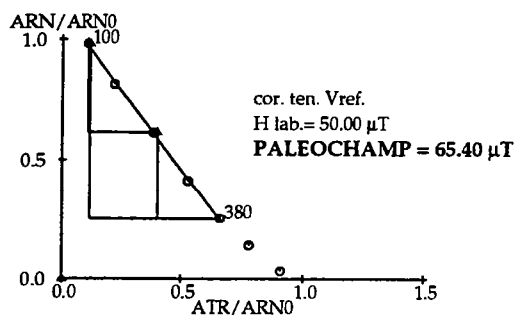
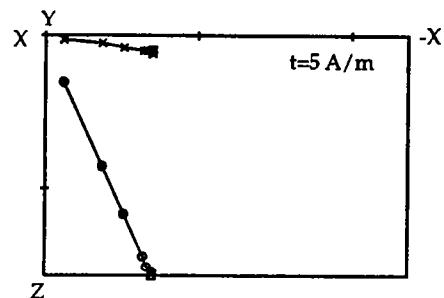




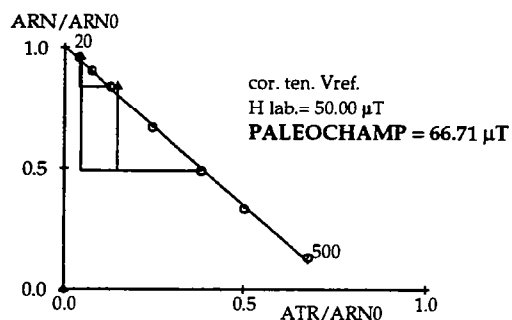
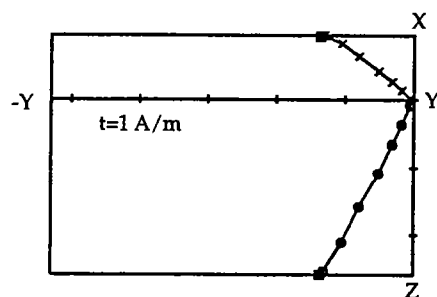
11salf8-1P3



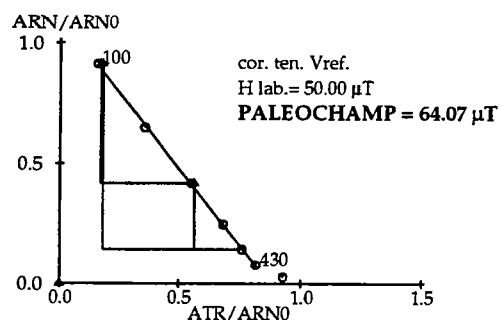
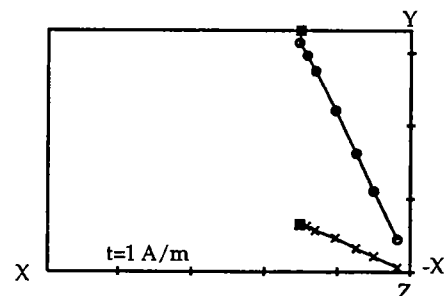
11salf8-3P1A



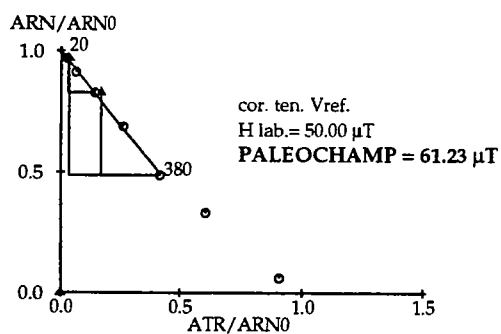
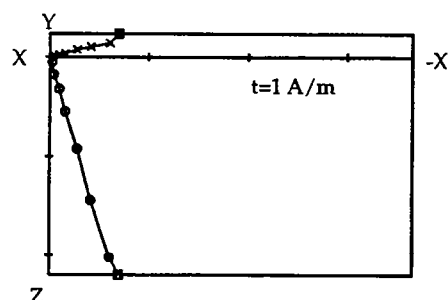
11salf8-4P1



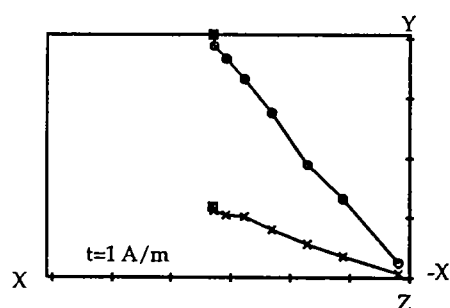
11salf8-10P1

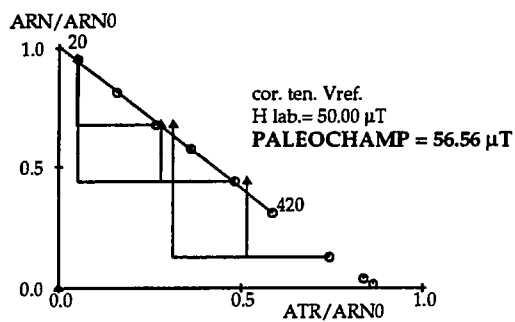


11salf8-13P1

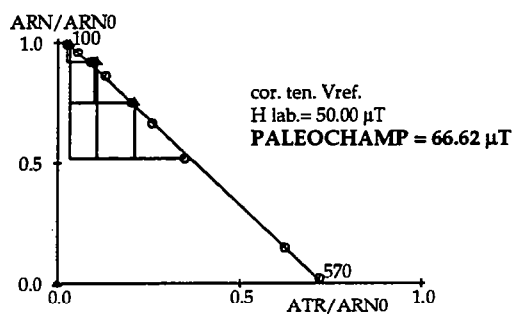
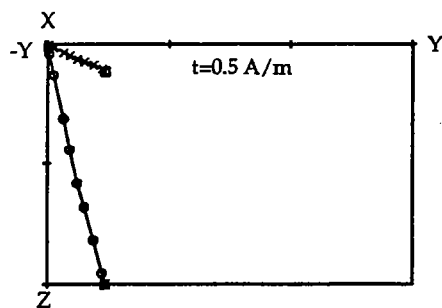


11salf8-18P2

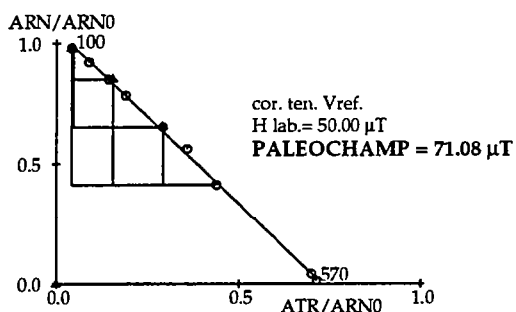
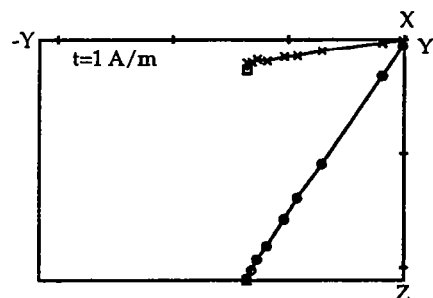




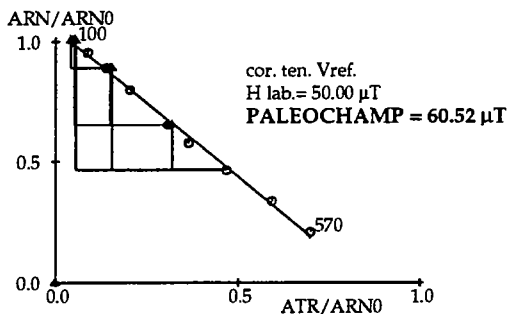
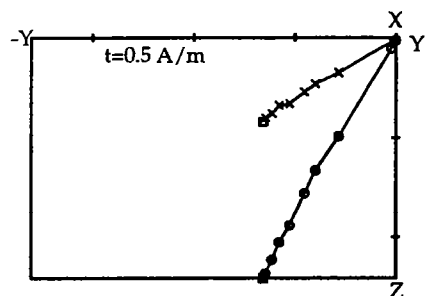
11salf9-3P



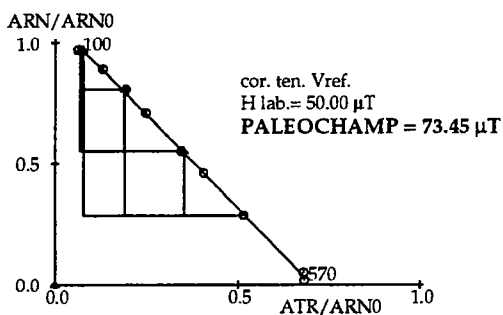
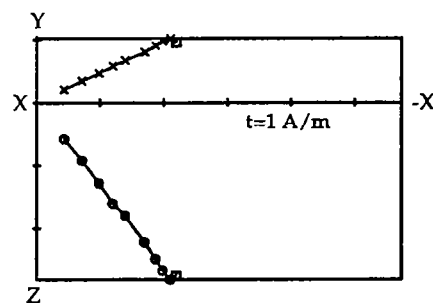
11salf9-6P



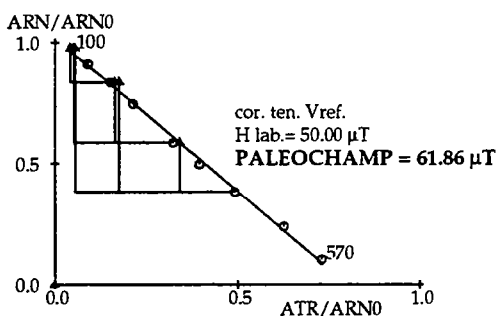
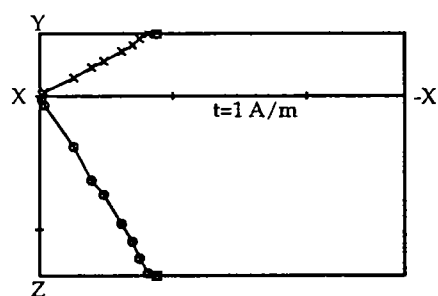
11salf9-8P



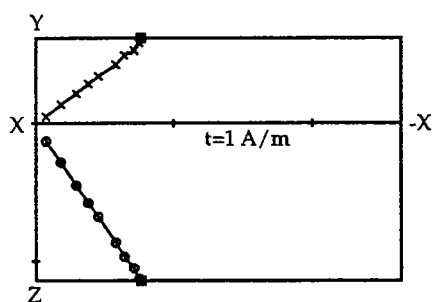
11salf9-12P

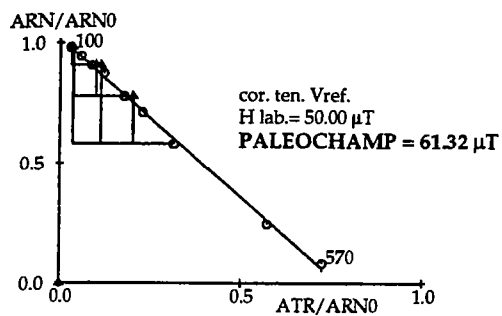


11salf9-16P

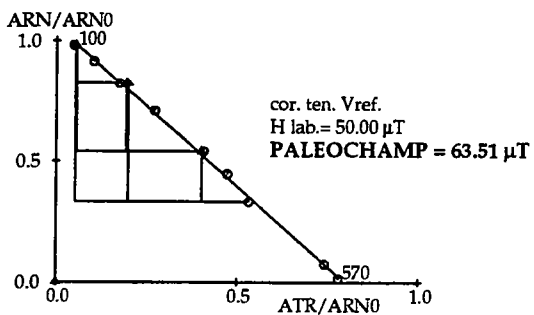
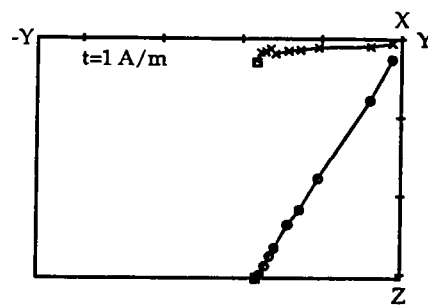


11salf9-18Pb

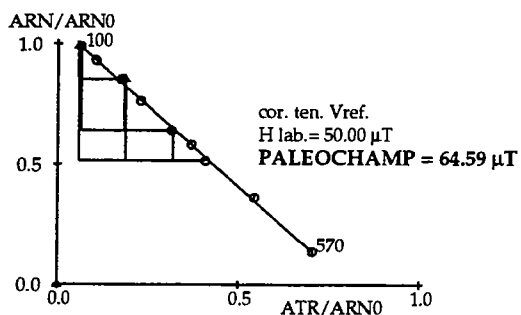
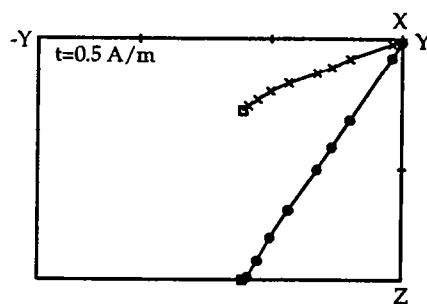




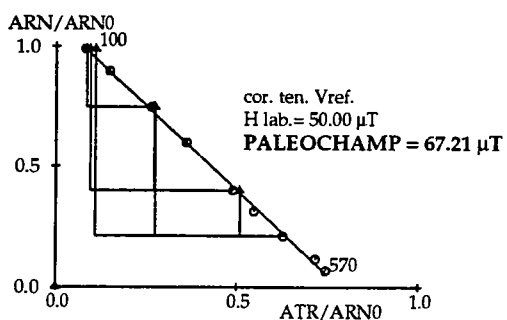
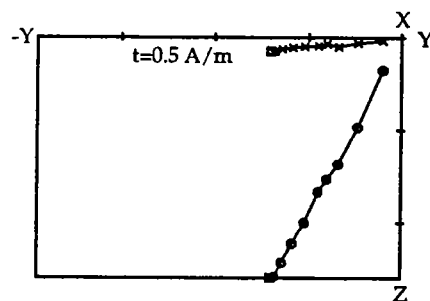
11salf9-5P



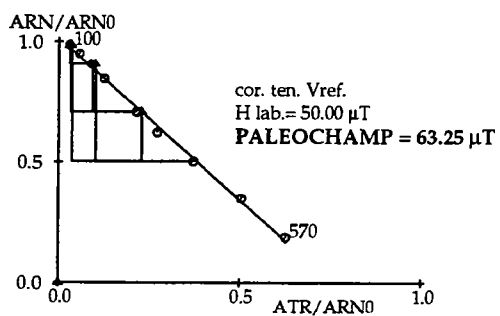
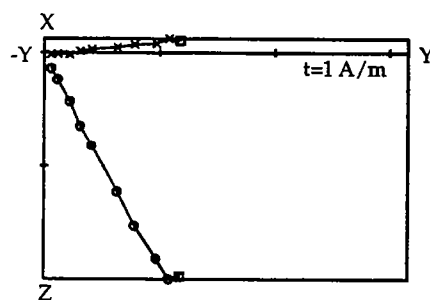
11salf9-7P



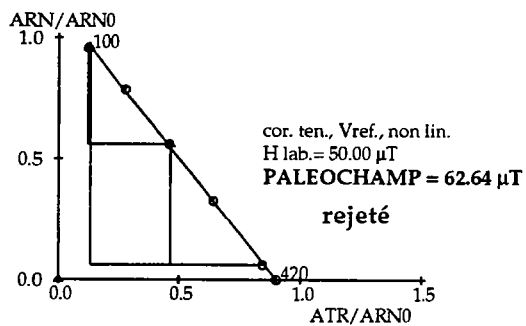
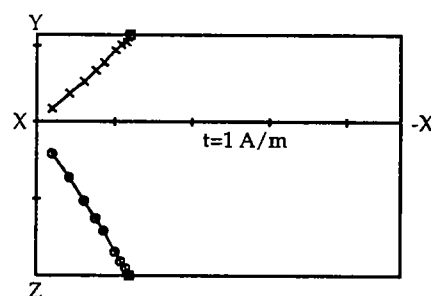
11salf9-10P



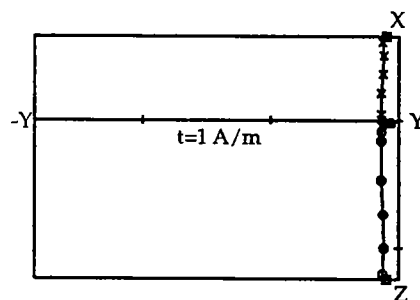
11salf9-15P

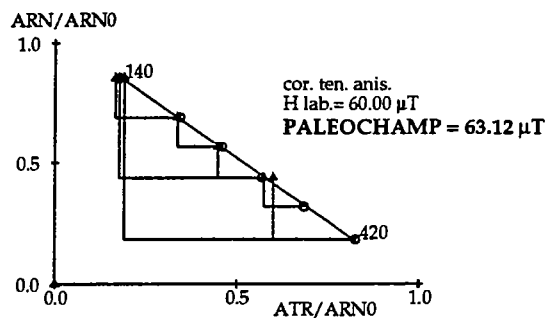


11salf9-18Pa

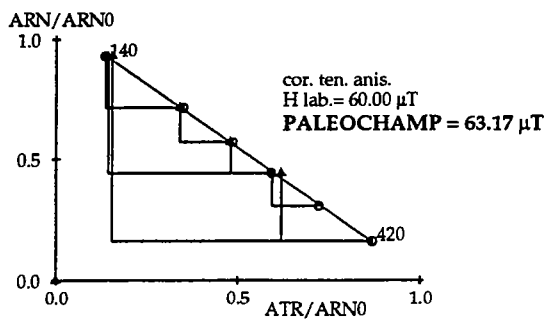
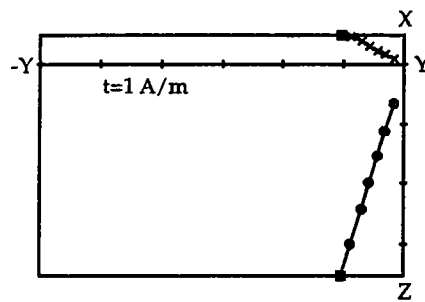


11salf9-20P

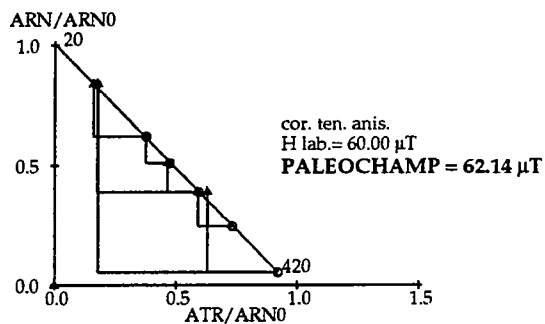
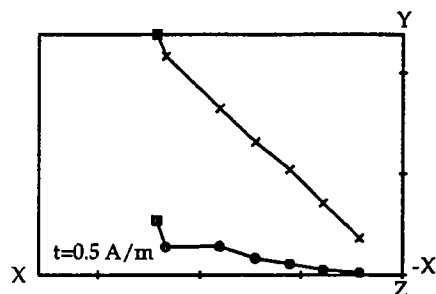




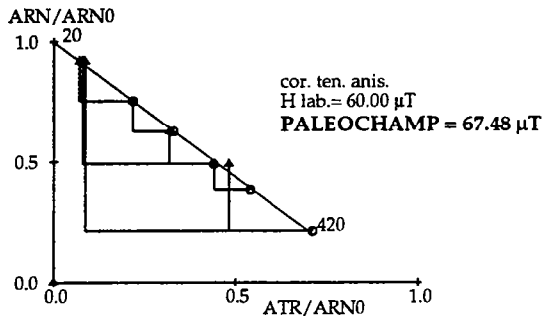
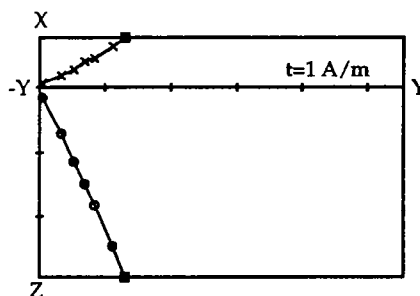
11salf10-1P1



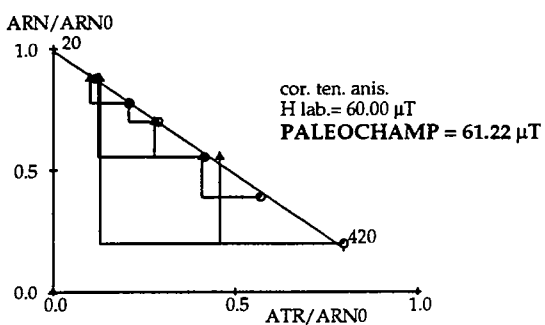
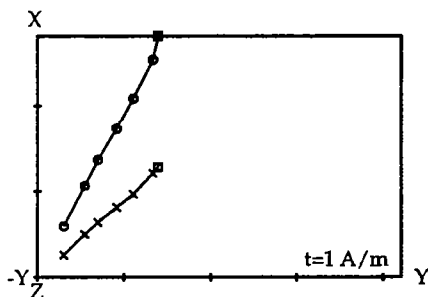
11salf10-2P0



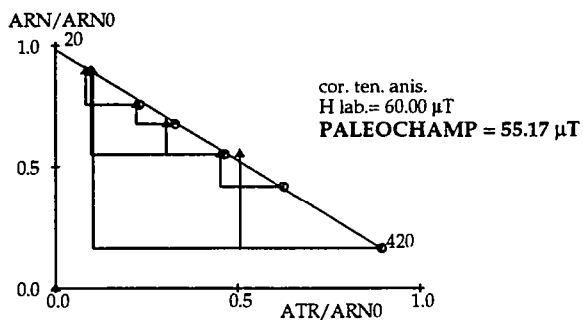
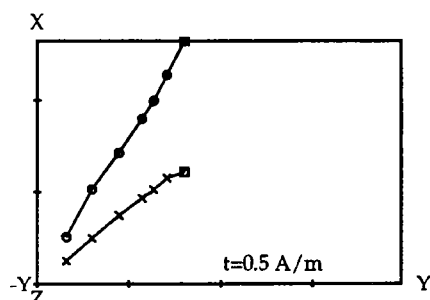
11salf10-3P4



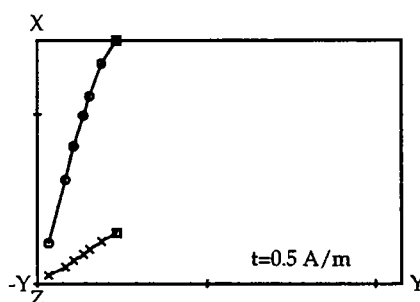
11salf10-9P0

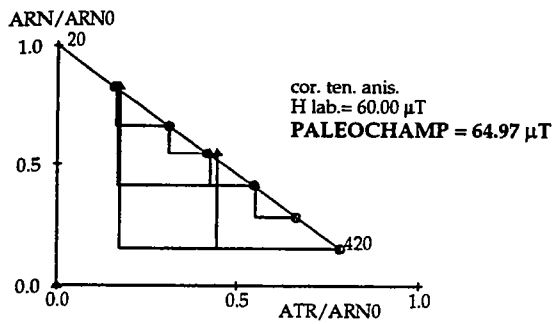


11salf10-10P1

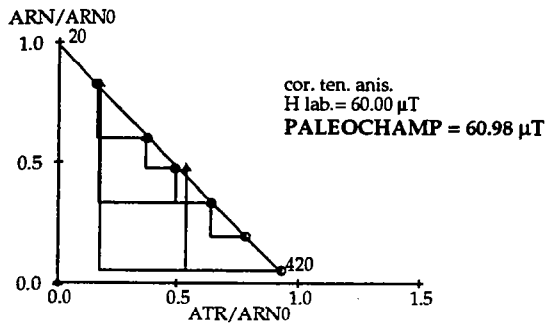
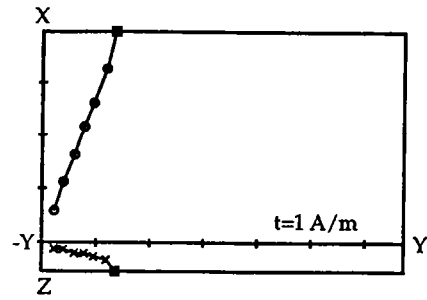


11salf10-12P0

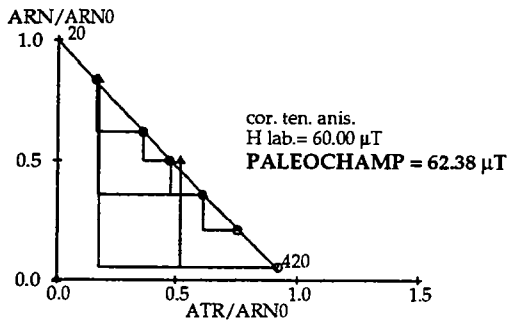
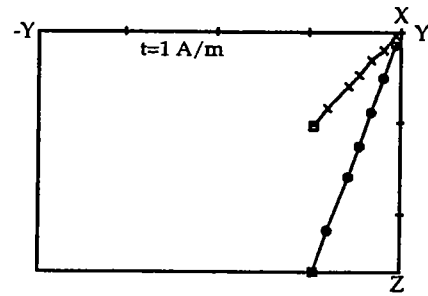




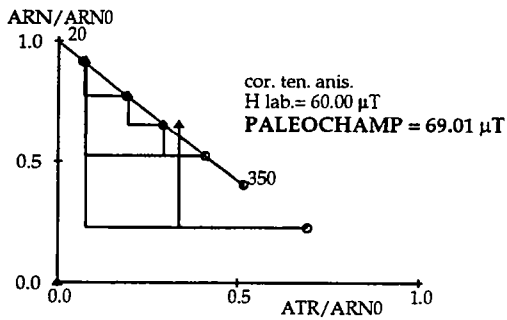
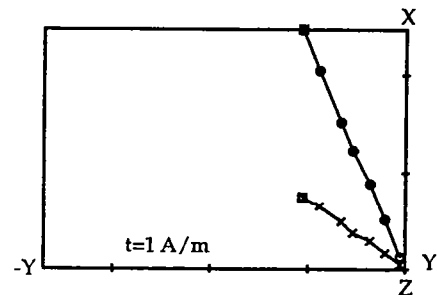
11salf10-1P4



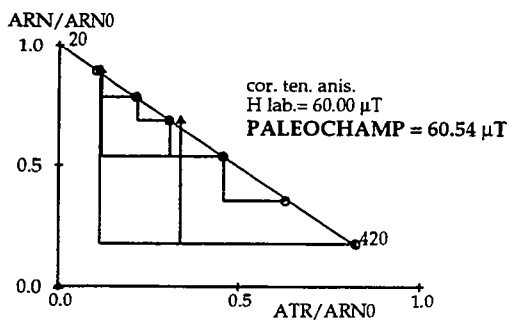
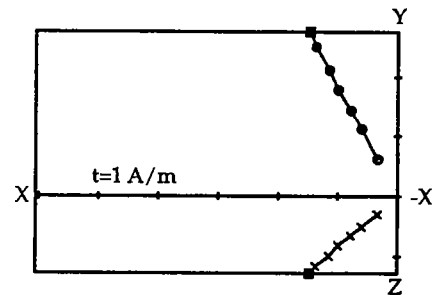
11salf10-2P1



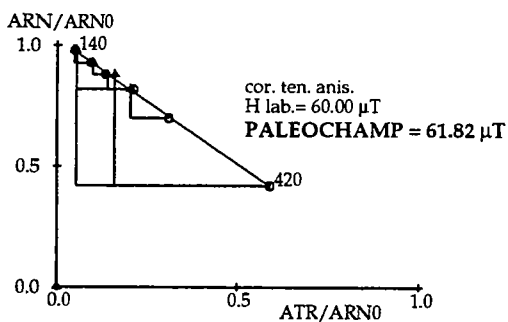
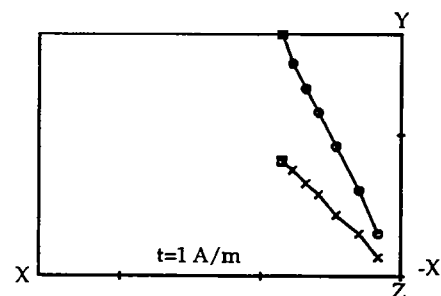
11salf10-3P6



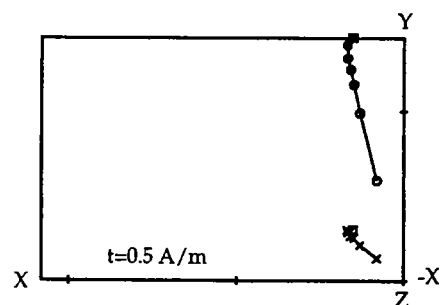
11salf10-9P1

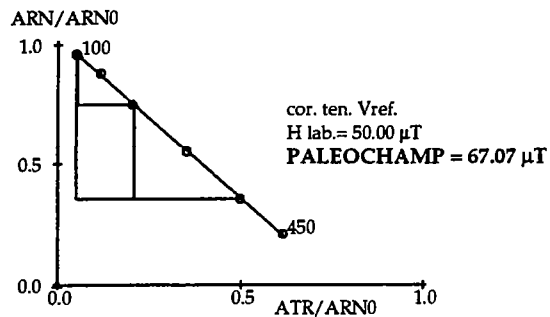


11salf10-10P2

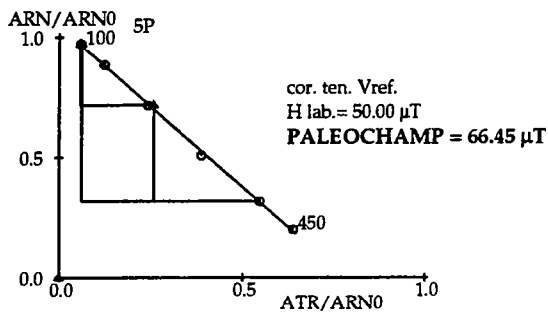
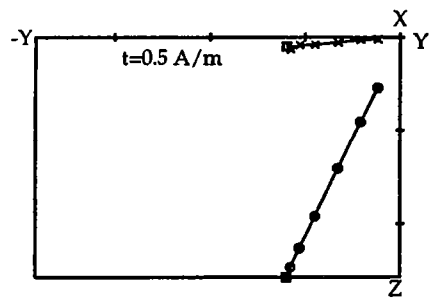


11salf10-12P3

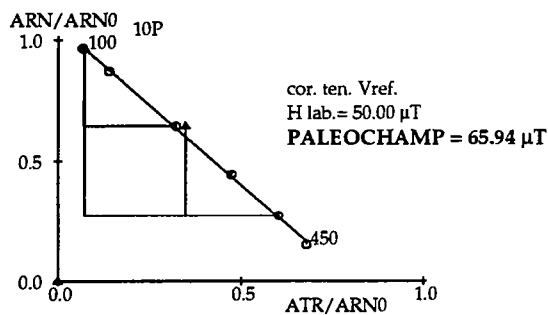
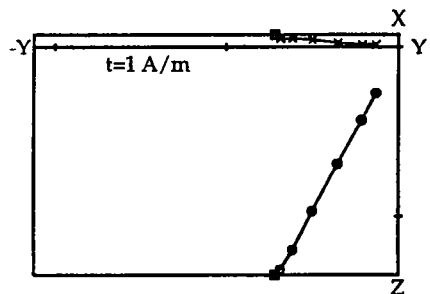




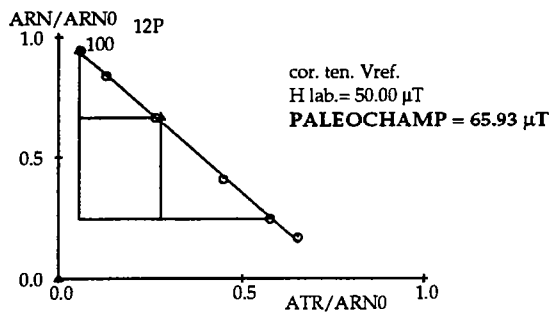
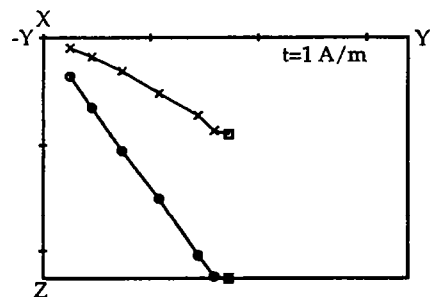
11salf12-2P



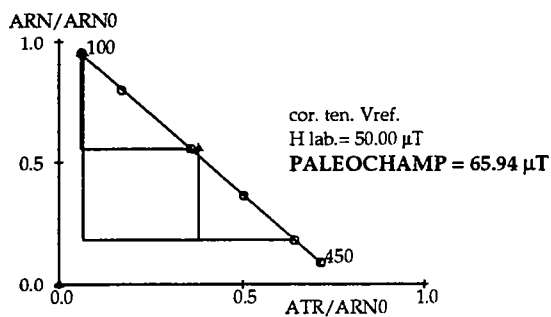
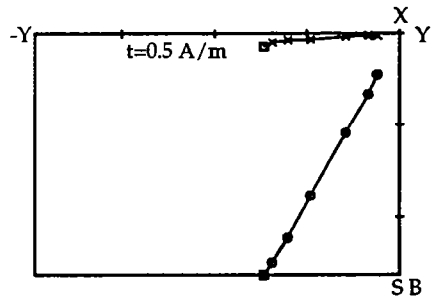
11salf12-5P



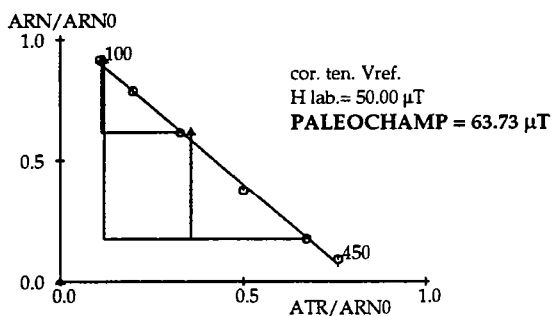
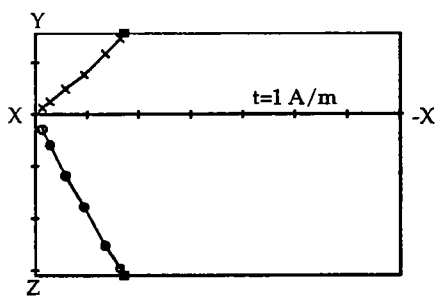
11salf12-10P



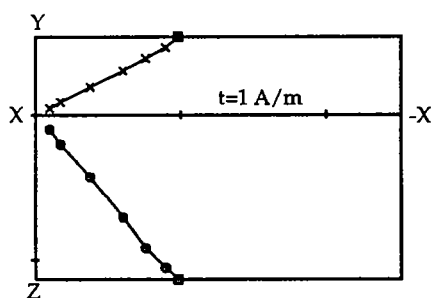
11salf12-12P

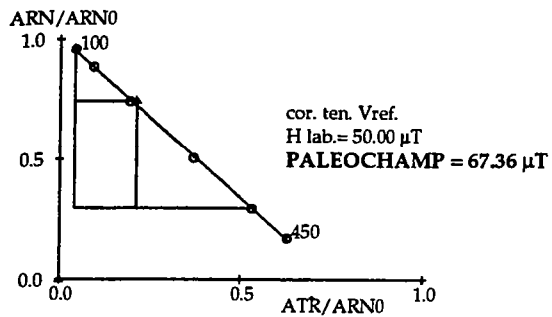


11salf12-14P

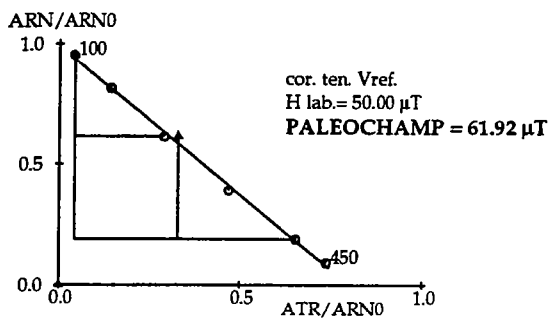
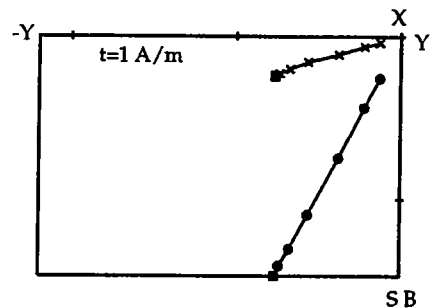


11salf12-15P'

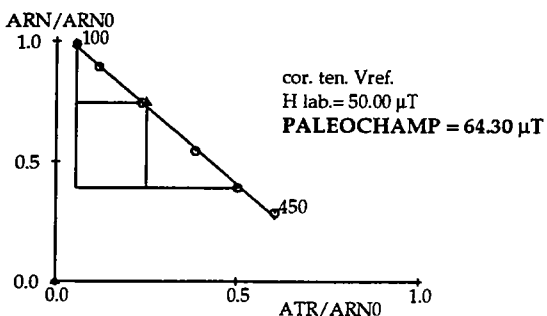
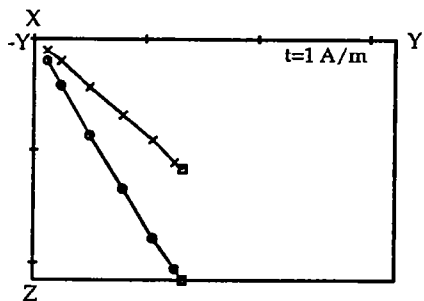




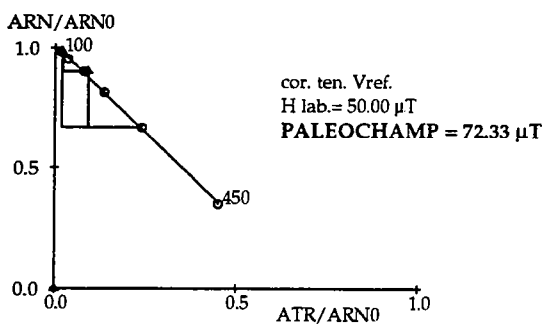
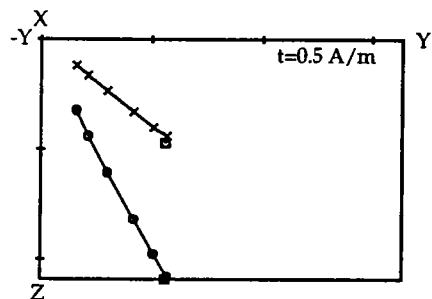
11salf12-3P



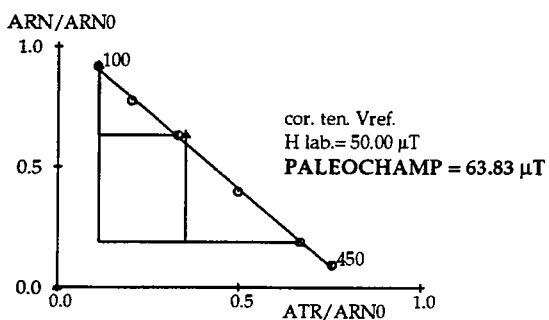
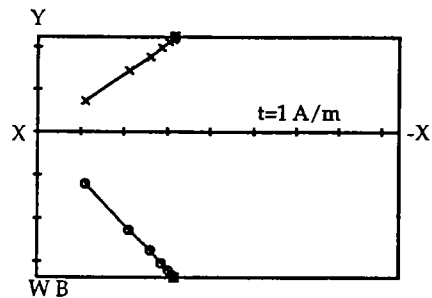
11salf12-9P



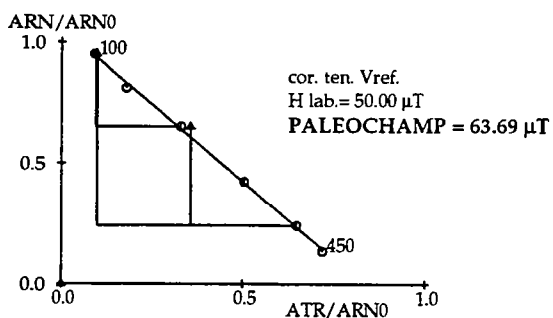
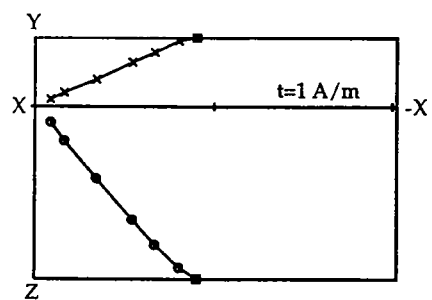
11salf12-11P



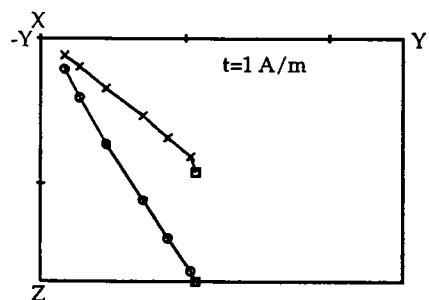
11salf12-13P

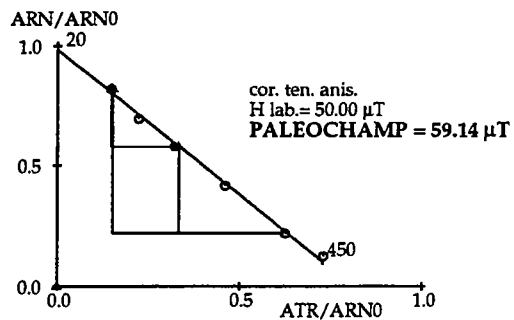


11salf12-15P

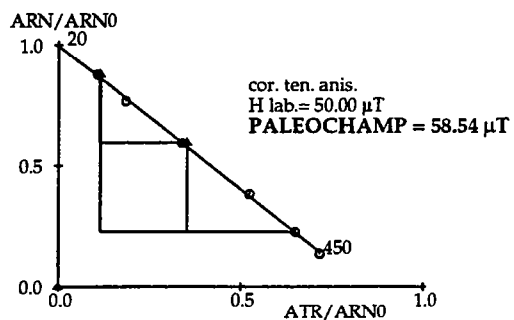
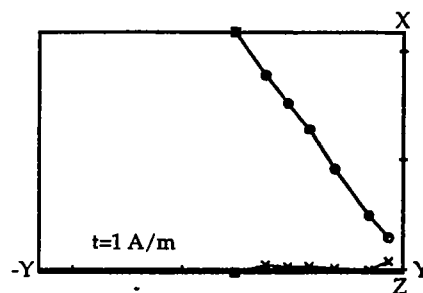


11salf12-18P

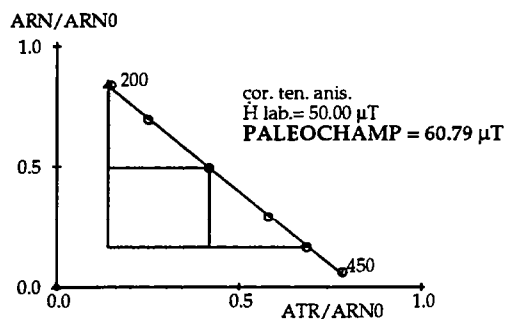
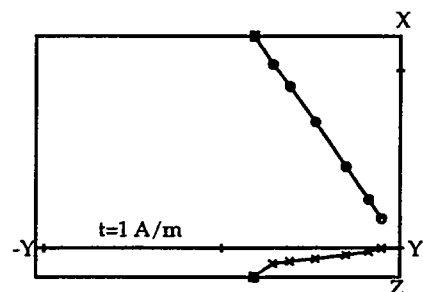




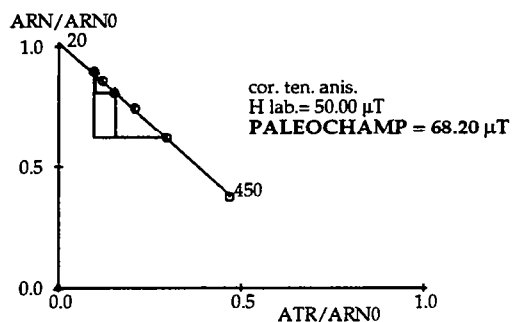
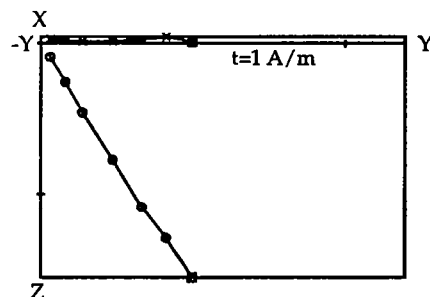
11salf13-3P1



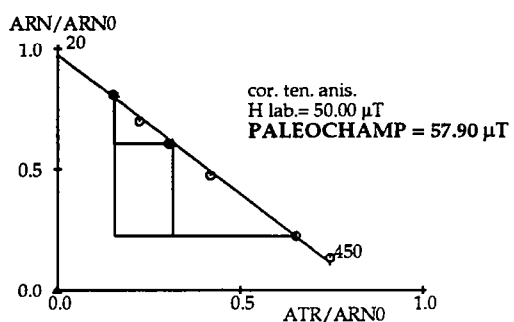
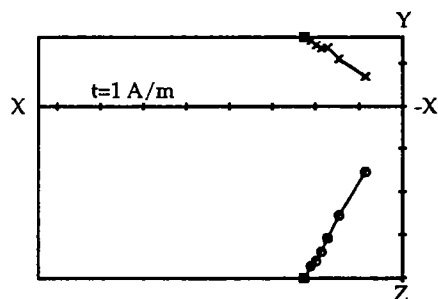
11salf13-6P1



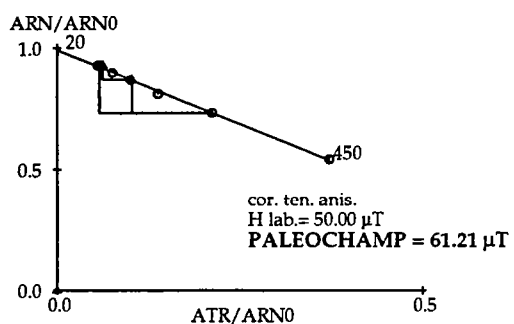
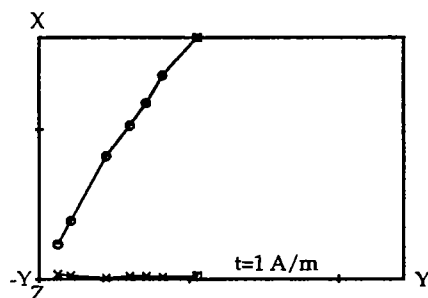
11salf13-12P1



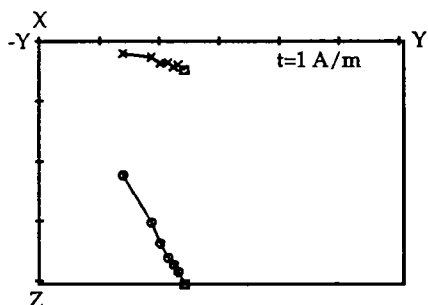
11salf13-13P1



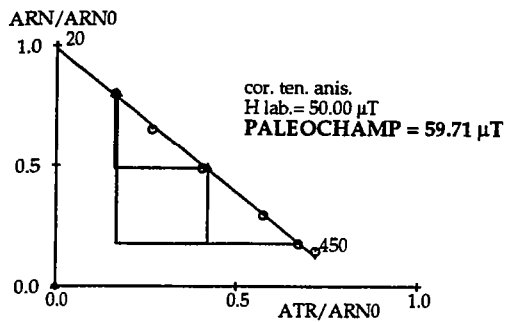
11salf13-14P1



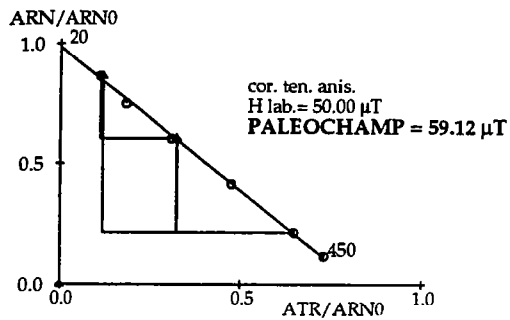
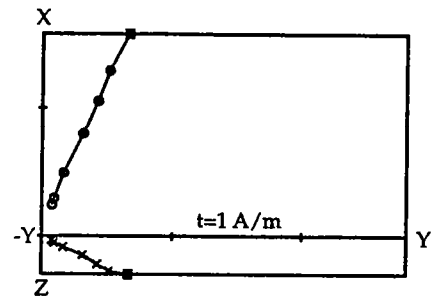
11salf13-14P3



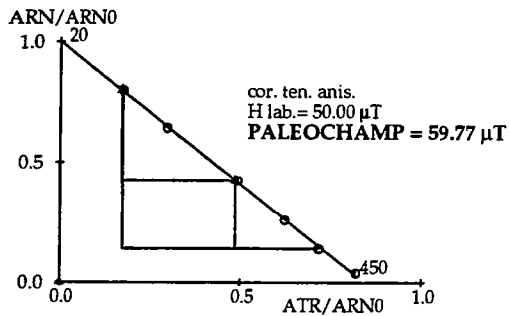
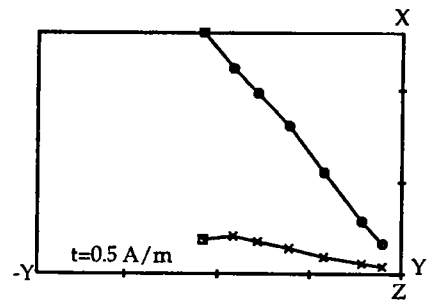




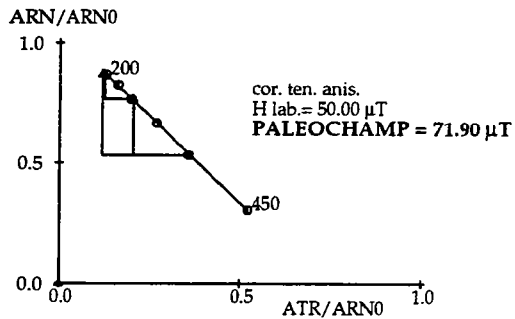
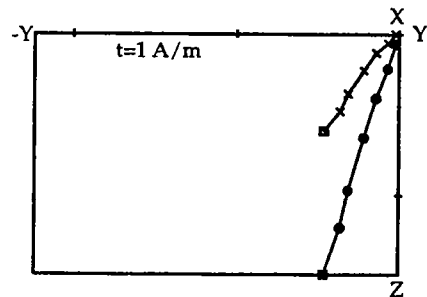
11salf13-3P2



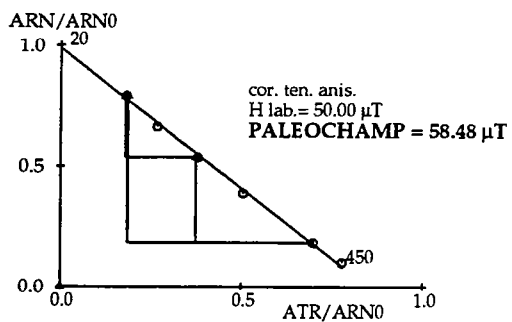
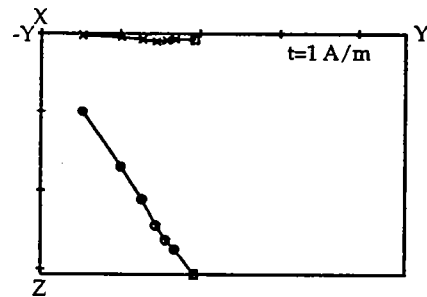
11salf13-6P2



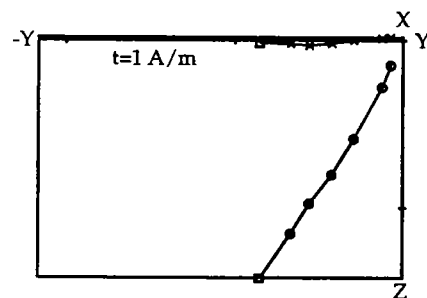
11salf13-12P2

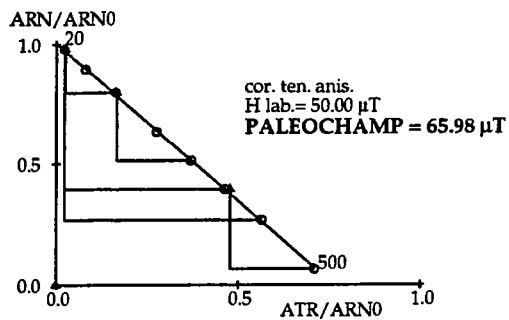


11salf13-13P2

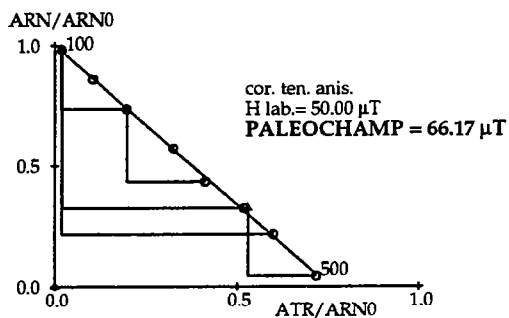
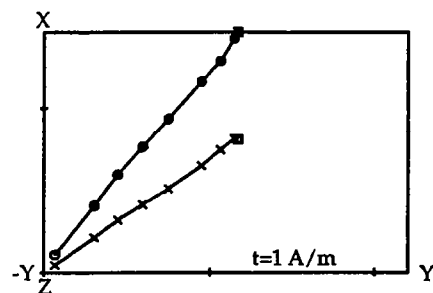


11salf13-14P2

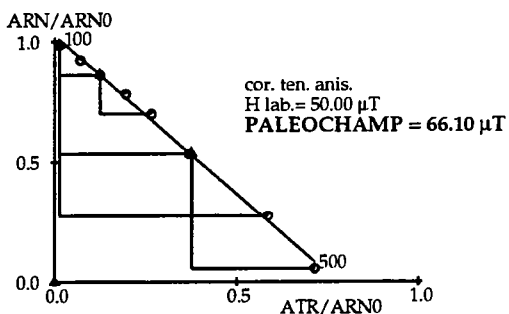
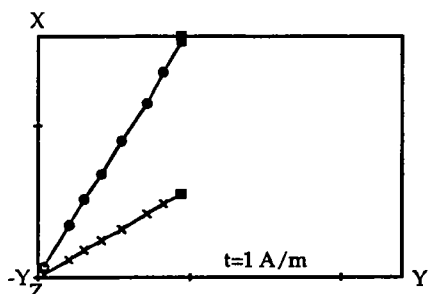




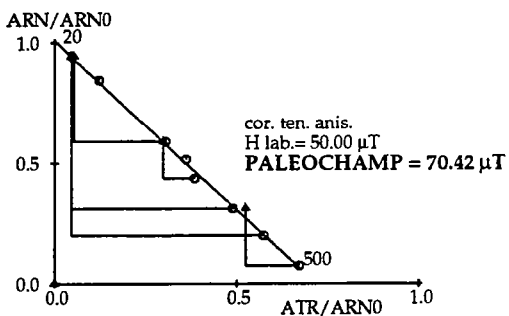
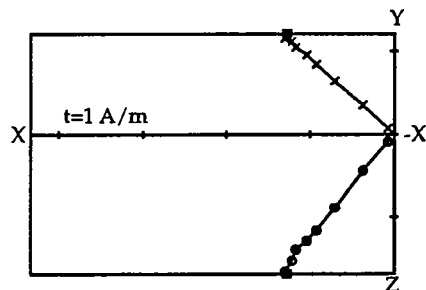
11salf14-1P1B



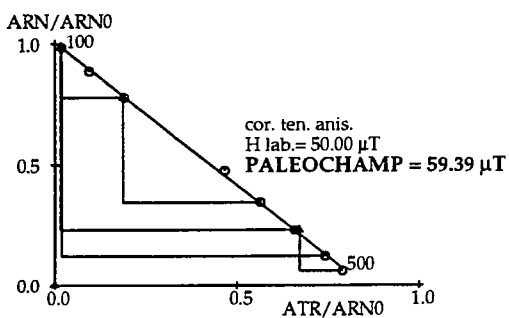
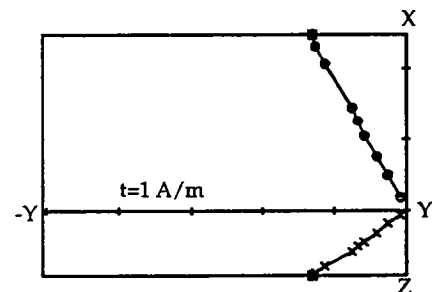
11salf14-2P1



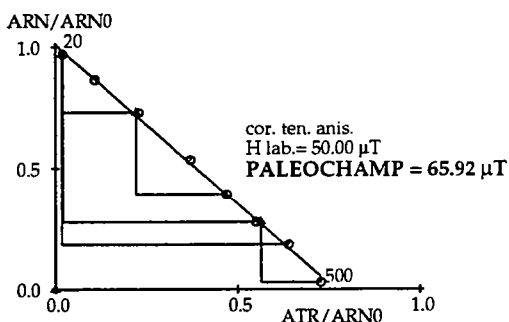
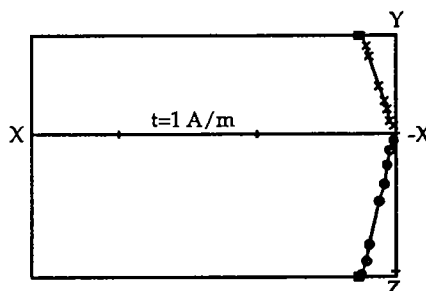
11salf14-3P1A



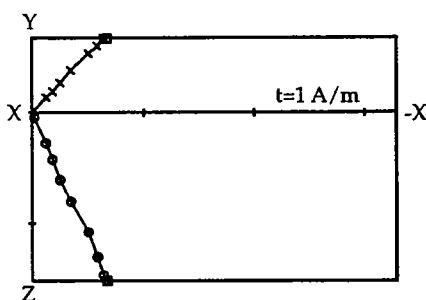
11salf14-4P1

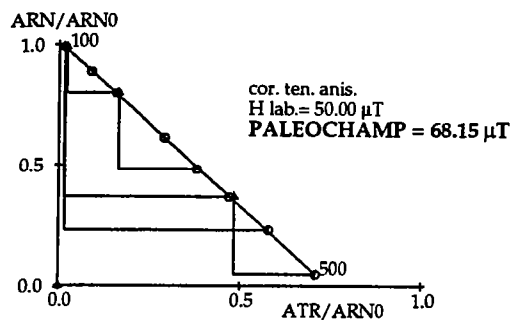


11salf14-9P1B

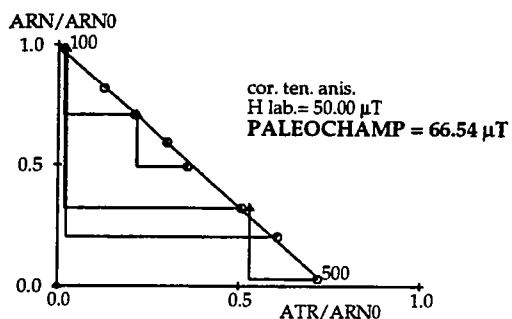
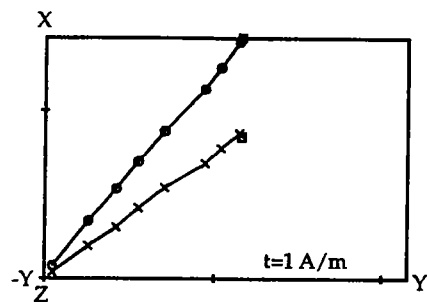


11salf14-17P1C

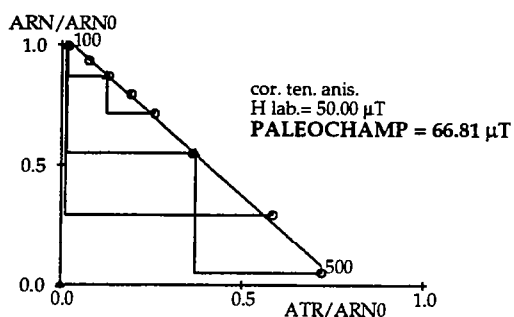
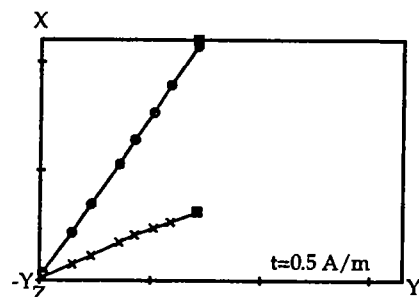




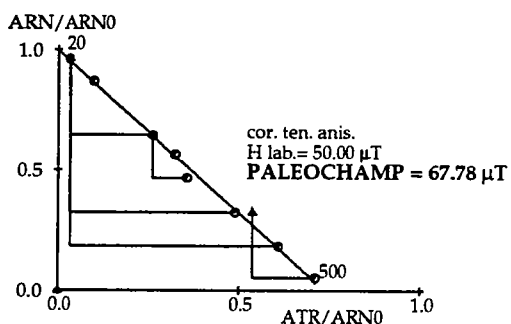
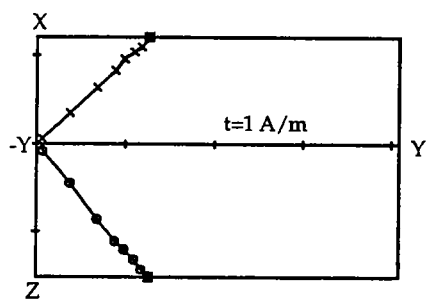
11salf14-1P2B



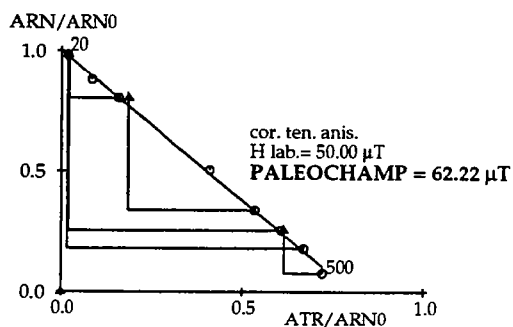
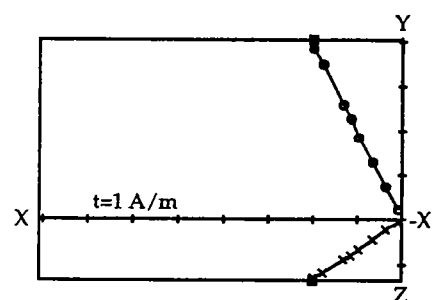
11salf14-2P2



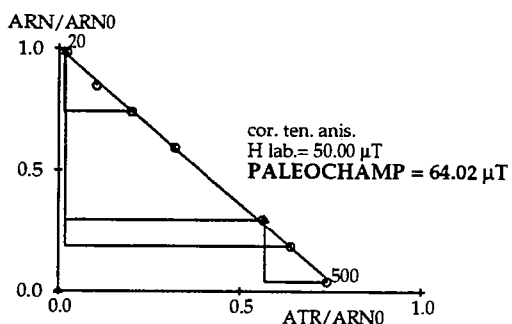
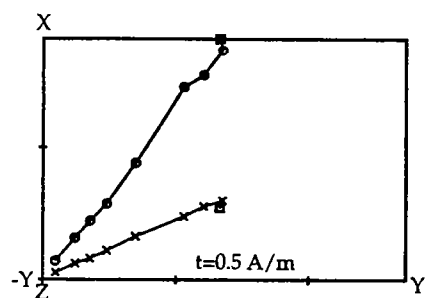
11salf14-3P1B



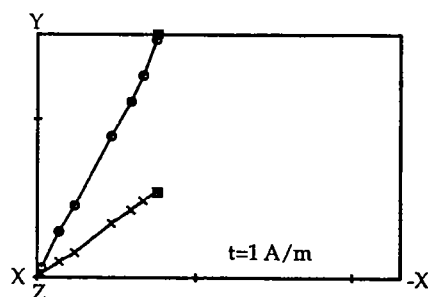
11salf14-4P3

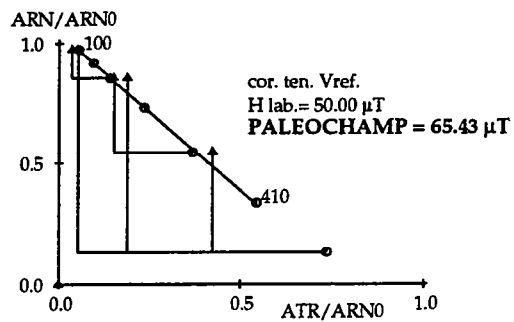


11salf14-9P2

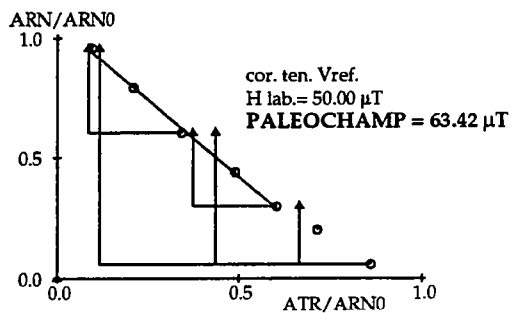
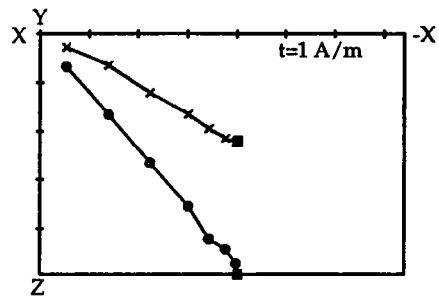


11salf14-17P2

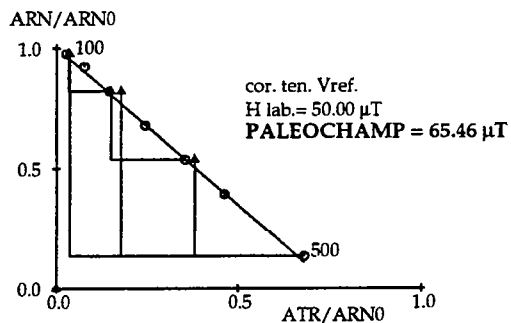
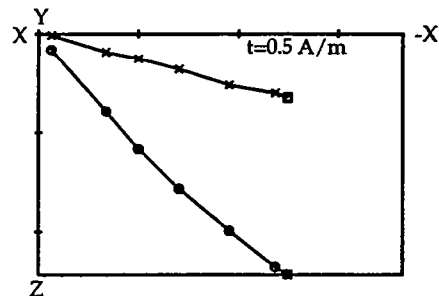




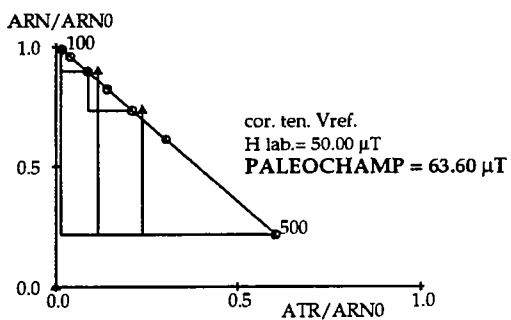
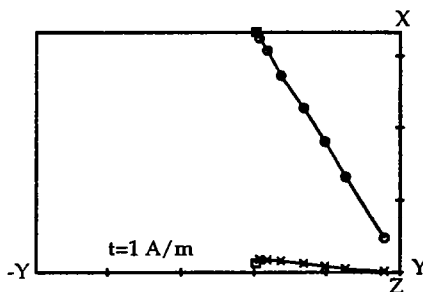
11salf15-1P



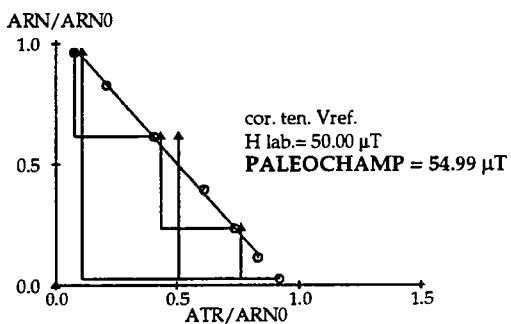
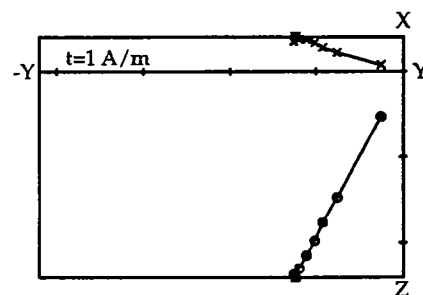
11salf15-4P



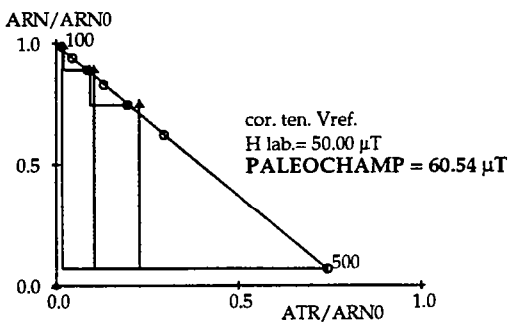
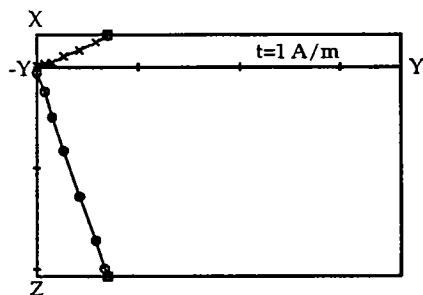
11salf15-10P



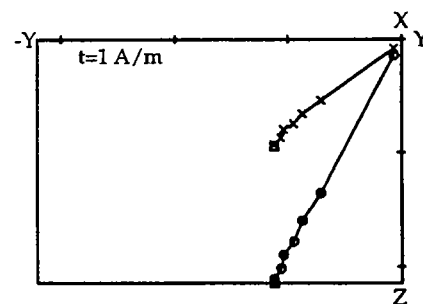
11salf15-12P

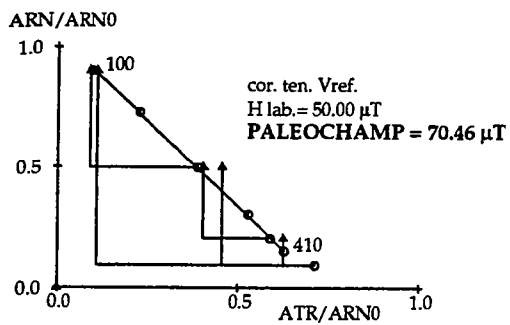


11salf15-17P

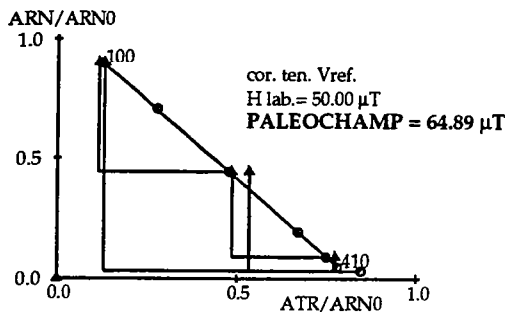
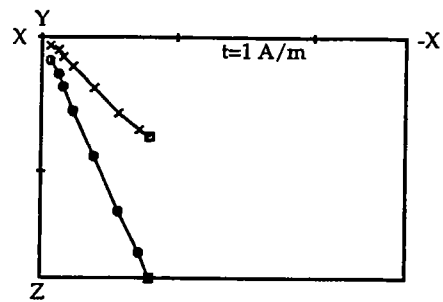


11salf15-19P

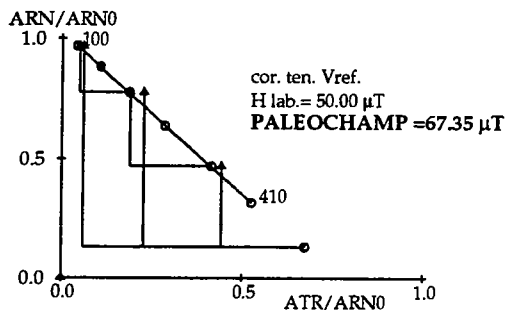
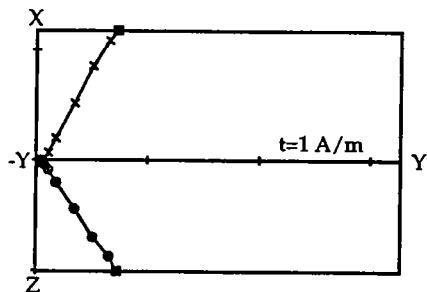




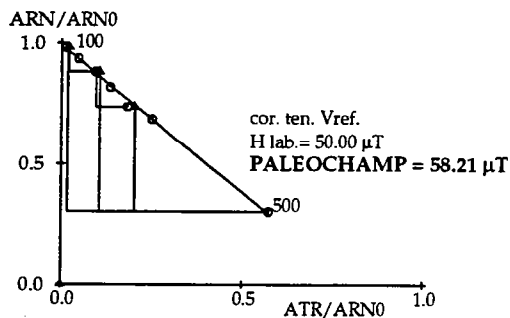
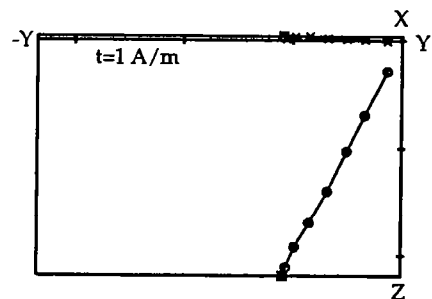
11salf15-3P



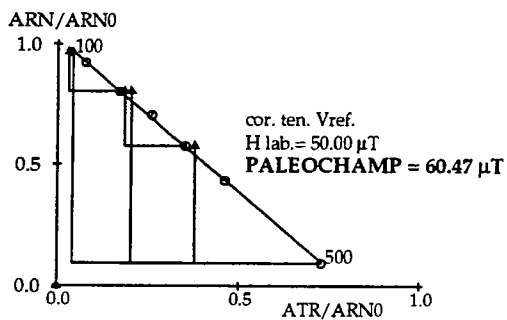
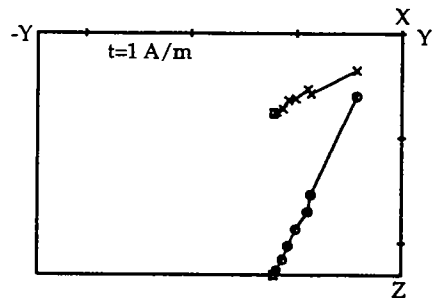
11salf15-6P



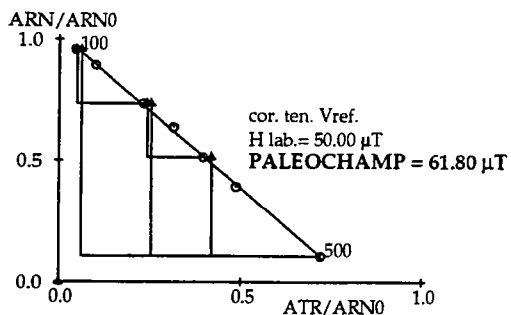
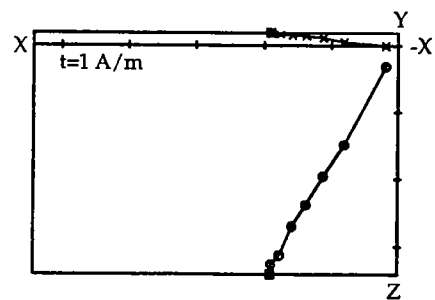
11salf15-11P



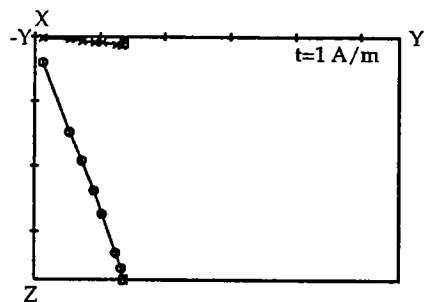
11salf15-15P



11salf15-18P



11salf15-20P





**MEMOIRES DE GEOSCIENCES-RENNES**  
**Université de Rennes I - Campus de Beaulieu**  
**35042 - RENNES Cedex . Tel /fax : 02- 99.28.60.80**

**Dans la même collection :**

**N°1 - H. MARTIN** - Nature, origine et évolution d'un segment de croûte continentale archéenne : contraintes chimiques et isotopiques. Exemple de la Finlande orientale. 392 p., 183 fig., 51 tabl., 4 pl. (1985). **Epuisé**

**N°2 - G. QUERRE** - Palingénèse de la croûte continentale à l'Archéen : Les granitoïdes tardifs (2,5-2,4 Ga) de Finlande Orientale. Pétrologie et géochimie. 226 p., 74 fig., 41 tabl., 3 pl. (1985). **Epuisé**

**N°3 - J. DURAND** - Le Grès Armoricaïn. Sédimentologie. Traces fossiles. Milieux de dépôt. 150 p., 76 fig., 9 tabl., 19 pl. (1985). **Epuisé**

**N°4 - D. PRIOUR** - Genèse des zones de cisaillement : Application de la méthode des éléments finis à la simulation numérique de la déformation des roches. 157 p., 106 fig., 7 tabl. (1985). **55F.**

**N°5 - V. NGAKO** - Evolution métamorphique et structurale de la bordure sud-ouest de la "série de Poli", segment camerounais de la chaîne panafricaine. 185 p., 76 fig., 16 tabl., 12 pl. (1986). **Epuisé**

**N°6 - J. DE POULPIQUET** - Etude géophysique d'un marqueur magnétique situé sur la marge continentale sud-armoricaine. 159 p., 121 fig., 5 tabl. (1986). **55F.**

**N°7 - P. BARBEY** - Signification géodynamique des domaines granulitiques. La ceinture des granulites de Laponie : une suture de collision continentale d'âge protérozoïque inférieur (1.9-2.4 Ga). 324 p., 89 fig., 46 tabl., 11 pl. (1986). **Epuisé**

**N°8 - Ph. DAVY** - Modélisation thermo-mécanique de la collision continentale. 233 p., 72 fig., 2 tabl. (1986). **Epuisé**

**N°9 - Y. GEORGET** - Nature et origine des granites peralumineux à cordiérite et des roches associées. Exemple des granitoïdes du Massif Armoricaïn (France) : Pétrologie et géochimie. 250 p., 140 fig., 67 tabl. (1986). **Epuisé**

**N°10 - D. MARQUER** - Transfert de matière et déformation progressive des granitoïdes. Exemple des massifs de l'Aar et du Gothard (Alpes Centrales Suisses). 287 p., 134 fig., 52 tabl., 5 cartes hors-texte (1987). **120 F.**

N°11 - J.S. SALIS - Variation séculaire du champ magnétique terrestre. Direction et Paléointensité sur la période 7.000-70.000 BP dans la Chaîne des Puys. 190 p., 73 fig., 28 tabl., 1 carte hors-texte (1987). 90F.

N°12 - Y. GERARD - Etude expérimentale des interactions entre déformation et transformation de phase. Exemple de la transition calcite-aragonite. 126 p., 42 fig., 3 tabl., 10 pl. (1987). 75F.

N°13 - H. TATTEVIN - Déformation et transformation de phases induites par ondes de choc dans les silicates. Caractérisation par la microscopie électronique en transmission. 150 p., 50 fig., 1 tabl., 13 pl. (1987). 95F.

N°14 - J.L. PAQUETTE - Comportement des systèmes isotopiques U-Pb et Sm-Nd dans le métamorphisme éclogitique. Chaîne Hercynienne et Chaîne Alpine. 190 p., 88 fig., 39 tab., 2 pl. (1987). 95F.

N°15 - B. VENDEVILLE - Champs de failles et tectonique en extension; modélisation expérimentale. 392 p., 181 fig., 1 tabl., 82 pl. (1987). Epuisé

N°16 - E. TAILLEBOIS - Cadre géologique des indices sulfurés à Zn, Pb, Cu, Fe du secteur de Gouézec-St-Thois : Dévono-Carbonifère du flanc Sud du Bassin de Châteaulin (Finistère). 195 p., 64 fig., 41 tabl., 8 pl. photo., 8 pl. h.texte. (1987). 110F

N°17 - J.P. COGNE - Contribution à l'étude paléomagnétique des roches déformées. 204 p., 86 fig., 17 tabl. (1987). 90F.

N°18 - E. DENIS - Les sédiments briovériens (Protérozoïque supérieur) de Bretagne septentrionale et occidentale : Nature, mise en place et évolution. 263 p., 148 fig., 26 tab., 8 pl. (1988). 140F.

N°19 - M. BALLEVRE - Collision continentale et chemins P-T : l'Unité pennique du Grand Paradis (Alpes Occidentales). 340 p., 146 fig., 10 tabl., (1988). Epuisé

N°20 - J.P. GRATIER - L'équilibrage des coupes géologiques. Buts, méthodes et applications. Atelier du Groupe d'Etudes Tectoniques le 8 Avril 1987 à Rennes. 165 p., 82 fig., 2 tabl. (1988). 85F.

N°21 - R.P. MENOT - Magmatismes paléozoïques et structuration carbonifère du Massif de Belledonne (Alpes Françaises). Contraintes nouvelles pour les schémas d'évolution de la chaîne varisque ouest-européenne. 465 p., 101 fig., 31 tab., 6 pl., (1988). 200F



- N°22 - S. BLAIS - Les ceintures de roches vertes archéennes de Finlande Orientale : Géologie, pétrologie, géochimie et évolution géodynamique. 312 p., 107 fig., 98 tab., 11 pl. photo, 1 pl. h.texte, (1989). 160F
- N°23 - A. CHAUVIN - Intensité du champ magnétique terrestre en période stable de transition, enregistrée par des séquences de coulées volcaniques du Quaternaire. 217 p., 100 fig., 13 tab. (1989). 100F.
- N°24 - J.P. VUICHARD - La marge austroalpine durant la collision alpine; évolution tectonométamorphique de la zone de Sesia-Lanzo. 307 p., 143 fig., 26 tab., 6 pl. hors-texte. (1989). 170F.
- N°25 - C. GUERROT - Archéen et Protérozoïque dans la chaîne hercynienne ouest-européenne : géochimie isotopique (Sr-Nd-Pb) et géochronologie U-Pb sur zircons. 180 p., 68 fig., 29 tab., 1 pl. (1989) 90F.
- N°26 - J.L. LAGARDE - Granites tardi-carbonifères et déformation crustale. L'exemple de la Méseta marocaine. 353 p., 244 fig., 15 pl. (1989) 210F.
- N°27 - Ph. BARDY - L'orogène cadomien dans le Nord-Est du Massif Armoricaïn et en Manche Occidentale. Etude tectonométamorphique et géophysique. 395 p., 142 fig., 7 tab., 1 pl. hors-texte. (1989). 175F.
- N°28 - D. GAPAIS - Les Orthogneiss : Structures, mécanismes de déformation et analyse cinématique. 377 p., 184 fig., 3 tab. (1989). 275F.
- N°29 - E. LE GOFF - Conditions pression-température de la déformation dans les orthogneiss : Modèle thermodynamique et exemples naturels. 321 p., 146 fig., 42 tab. (1989). 150F.
- N°30 - D. KHATTACH - Paléomagnétisme de formations paléozoïques du Maroc. 220 p., 97 fig., 35 tab., (1989). 100F.
- N°31 - A. HAIDER - Géologie de la formation ferrifère précambrienne et du complexe granulitique encaissant de Buur (Sud de la Somalie). Implications sur l'évolution crustale du socle de Buur. 215 p., 18 fig., 42 tab., 7 pl. (1989). 130 F.
- N°32 - T. DANIEL - Traitement numérique d'image appliqué à l'analyse texturale de roches déformées. 186 p., 121 fig., 4 tab. (1989). 210 F.
- N°33 - C. LECUYER - Hydrothermalisme fossile dans une paléocroûte océanique associée à un centre d'expansion lent : Le complexe ophiolitique de Trinity (N. Californie, U.S.A.). 342 p., 109 fig., 73 tab. (1989). 200 F.

N°34 - P. RICHARD - Champs de failles au dessus d'un décrochement de socle: modélisation expérimentale. 382 p., 137 fig. (1989). 400 F.

N°35 - J. de BREMOND d'ARS - Estimation des propriétés rhéologiques des magmas par l'étude des instabilités gravitaires. Pétrologie du complexe plutonique lité de Guernesey. 370 p., 128 fig., 64 tabl. (1989). 180 F.

N°36 - A. LE CLEACH - Contribution à l'étude des propriétés physiques des minéraux à haute pression : Spectroscopie et calcul des grandeurs thermodynamiques de la lawsonite, des épidotes et des polymorphes de SiO<sub>2</sub>. 190 p., 72 fig., 37 tabl. (1989). 100 F.

N°37 - O. MERLE - Cinématique des nappes superficielles et profondes dans une chaîne de collision. 280 p., 165 fig., 3 tabl. (1990). 160F.

N°38 - P. ALLEMAND - Approche expérimentale de la mécanique du rifting continental. 205 p., 106 fig., 13 tabl. (1990). 160F.

N°39 - Ch. BASILE - Analyse structurale et modélisation analogique d'une marge transformante : l'exemple de la marge de Côte-d'Ivoire - Ghana. 230 p., 161 fig., 7 tabl. ( 1990 ). 130F .

N°40 - M. AUDIBERT - Déformation discontinue et rotations de blocs. Méthodes numériques de restauration. Application à la Galilée. 250 p., 80 fig., 5 tabl., (1991). 150F.

N°41 - G. RUFFET - Paléomagnétisme et <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar : étude combinée sur des intrusions précambriennes et paléozoïques du Trégor (Massif Armoricaïn) . 261 p., 80 fig., 19 tabl. (1991). 120F.

N°42 - P. SUZANNE - Extrusion latérale de l'Anatolie : Géométrie et mécanisme de la fracturation. 262 p., 100 fig., 12 pl., 5 tabl. (1991). 210F.

N°43 - G. FIQUET - Propriétés thermodynamiques de minéraux du manteau supérieur. Calorimétrie à haute température et spectroscopie Raman à haute pression et haute température. 274 p., 101 fig., 53 tabl. (1991). 130F.

N°44 - J. MARTINOD - Instabilités périodiques de la lithosphère (Flambage, Boudinage en compression et en extension). 283 p., 117 fig., 3 tabl., 2 pl. couleur. (1991). 170F.

N°45 - M.O. BESLIER - Formation des marges passives et remontée du manteau: Modélisation expérimentale et exemple de la marge de la Galice. 257 p., 86 fig., 5 tab., 2 pl. noir/blanc, 2 Pl. couleur. (1991). 180F.

- N°46 - J.B.L. FRANCOLIN - Analyse structurale du Bassin du Rio Do Peixe. (Brésil) : 250 p., 83 fig., 3 tab., 9 pl. couleur. (1992). 300F.
- N° 47 - S. TOURPIN - Perte des mémoires isotopiques (Nd, Sr, O) et géochimiques (REE) primaires des komatiites au cours du métamorphisme : exemple de la Finlande Orientale. 185 p., 53 fig., 23 tabl. (1992). 100F.
- N° 48 - J.A. BARRAT - Genèse des magmas associés à l'ouverture d'un domaine océanique : Géochimie des laves du Nord-Est de l'Afrique (Mer Rouge - Afar) et d'Arabie. 175 p., 47 fig., 23 tab. (1992). 100F.
- N° 49 - E. HALLOT - Injection dans les réservoirs magmatiques. Contraintes pétrologiques (Massifs de Fort La Latte et de Saint Brieuc, Bretagne Nord) et modélisation analogique. 331 p., 101 fig., 30 tabl. (1993). 180F.
- N°50 - T. SOURIOT - Cinématique de l'extension post-pliocène en Afar. Imagerie SPOT et modélisation analogique. 225 p., 2 pl. coul., 1 tabl., 91 fig., 16 pl. photo., 1 carte H.Texte. (1993). 190F.
- N° 51 - T. EUZEN - Pétrogenèse des granites de collision post- épaisissement. Le cas des granites crustaux et mantelliques du Complexe de Pontivy-Rostrenen (Massif Armoricaïn, France). 350 p., 2 pl. coul., 34 tabl. en annexe, (1993). 190F.
- N° 52 - J. LE GALL - Reconstitution des dynamismes éruptifs d'une province paléovolcanique : l'exemple du graben cambrien du Maine (Est du Massif Armoricaïn). Pétrogenèse des magmas andésitiques et ignimbritiques et leur signification dans l'évolution géodynamique cadomienne. 370 p., 30pl. photo., 1 pl. coul. (1993). 350 F.
- N° 53 - J. C. THOMAS - Cinématique tertiaire et rotations de blocs dans l'ouest de l'Asie Centrale (Tien Shan Kirghiz et dépression Tadjik). Etude structurale et paléomagnétique. 330 p., 107 fig., 2 pl. coul., 18 tabl., 1 carte, annexes. (1993). 220 F.
- N°54 - F. LAFONT - Influences relatives de la subsidence et de l'eustatisme sur la localisation et la géométrie des réservoirs d'un système deltaïque. Exemple de l'Eocène du bassin de Jaca, Pyrénées Orientales., 270 p., 115 fig., dont 17 pl. couleur. (1994). 150 F.
- N° 55 - C. BIELLMANN - Stabilité et réactivité des carbonates à très hautes pression et température. Implications pour le stockage du Carbone dans le manteau terrestre., 230 p., 74 fig., 11 tabl., 1 pl. couleur (1993). 175 F.

N°56 - A. POTREL - Evolution tectono-métamorphique d'un segment de croûte continentale archéenne. Exemple de l'Amsaga (R.I. Mauritanie), dorsale Réguibat (Craton Ouest Africain). 400 p., (dont annexes) 125 fig., 21 tabl., 1 pl. couleur, 43 pl. photo (1994). 270 F.

N° 57 - M. KUNTZ - Approche expérimentale de la déformation dans les systèmes préfracturés : Contribution à l'étude de l'inversion tectonique des bassins sédimentaires. 220 p., 19 pl., 87 fig., 3 tabl. (1994). 155 F.

N° 58 - D. ROUBY - Restauration en carte des domaines faillés en extension. Méthode et applications. 266 p., 98 fig. dont annexes (1994). 180 F.

N° 59 - J.J. TONDJI-BIYO - Chevauchements et bassins compressifs. Influence de l'érosion et de la sédimentation. Modélisation analogique et exemples naturels. 426 p., 141 fig., 4 pl. couleur, 21 tableaux, dont annexes (1995). 270 F.

N° 60 - H. BOUHALLIER - Evolution structurale et métamorphique de la croûte continentale archéenne (Craton de Dharwar, Inde du Sud). 277 p., 100 fig., dont 5 pl. coul., 7 tab., dont annexes (1995). 150 F.

N° 61 - P. GAUTIER - Géométrie crustale et cinématique de l'extension tardi-orogénique dans la domaine centre-égéen (îles des Cyclades et d'Eubée, Grèce). 430 p., 89 fig., dont 4 pl. coul., 1 tabl., dont annexes (1995). 220F.

N° 62 - M.T. ROMAN BERDIEL - Mécanismes d'intrusion des granites supracrustaux. Modèles analogiques et exemples naturels. 270 p., 75 fig., 5 pl. laser, 9 tabl. (1995). 160F.

N° 63 - M. JULLIEN - Polytypisme, ordre d'empilement et interstratification dans la cookéite et les phyllosilicates non micacés du métamorphisme. Influence de la pression. 226 p., 61 fig., 8 tabl. (1995). 150 F.

N° 64 - Y. LAHAYE - L'altération des komatiites. 224 p., 70 fig., 29 tabl., + annexes (1995). 150 F.

N° 65 - A. CRAVE - Quantification de l'Organisation des réseaux hydrographiques. 210 p., 68 fig., dont annexe (1995). 120 F.

N° 66 - A. ESSAIFI - Relations entre magmatisme-déformation et altération hydrothermale : L'exemple des Jebilet centrales (Hercynien, Maroc). 331 p., 248 fig., 4 tabl., dont annexes (1995). 170 F.

N° 67 - M. LE RAVALEC - Vitesses et perméabilité des roches : modélisation du rôle des fluides et des fissures. 276 p., 119 fig. 3 pl. couleur, 5 tabl., dont annexe (1995). 140 F.

- n° 68 - A. SEMIANI - Métallogénie de la zone de cisaillement aurifère est-ouzzalienne : structure, pétrologie et géochimie des gisements d'or de Tirek-Amesmess (Hoggar occidental, Algérie). 262 p., 72 fig., 36 tabl., 4 pl. couleur + annexes, (1995).  
130 F.
- N° 69 - F. MOREAU - Méthodes de traitement de données géophysiques par transformée en ondelettes. 177 p., 57 fig., + annexes. (1995).  
100 F.
- N° 70 - B. TOURNERIE - Imagerie de réflecteurs électromagnétiques en régime diffusif : Méthode et applications en Géophysique. 165 p., 45 fig., 8 tabl., + annexes, (1995).  
100 F.
- N° 71 - T. NALPAS - Inversion des grabens du Sud de la Mer du Nord. Données de sub-surface et modélisation analogique. 245 p., 110 fig., dont 10 pl. coul., (1994).  
120 F.
- N° 72 - M. URREIZTIETA - Tectonique néogène et bassins transpressifs en bordure méridionale de l'Altiplano-Puna (27°S), Nord-Ouest argentin. 311 p., 111 fig., 5 tabl., 6 pl. couleur, dont annexe. (1995).  
200 F.
- N° 73 - A.N. KOUAMELAN - Géochronologie et Géochimie des Formations Archéennes et Protérozoïques de la Dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la Transition Archéen-Protérozoïque. 290 p., 99 fig., 23 tabl., 2 pl. couleur, dont annexe (1996).  
120 F.
- N° 74 - Y. GARCIA - Variation de l'intensité du champ magnétique en France durant les deux derniers millénaires. 331 p., 122 fig., 35 tab., dont annexe. (1996).  
150 F.



# BON DE COMMANDE

à retourner à : Arlette FALAISE

GEOSCIENCES-RENNES I

Université de Rennes

35042 - RENNES Cédex (France)

Téléphone/Fax : 33-2-99-28-60-80

NOM .....

ORGANISME .....

ADRESSE .....

Veuillez me faire parvenir les ouvrages suivants :

N°	Auteur	Nb exemplaires	P.U.	Total
Frais d'envoi : 20,00F par volume			Total	
par volume supplémentaire : 5,00 F			Frais d'envoi	
			Montant total	

Nous acceptons les bons de commandes.

Si vous réglez par chèque veuillez établir votre chèque au nom de :

Monsieur l'Agent Comptable de l'Université de Rennes I.





**Imprimé à l'Université de Rennes I**

**Dépot Légal**

**4ème trimestre 1996**



## Résumé :

Cette étude cherche à répondre aux besoins des géomagnéticiens: connaissance de la variation séculaire du champ, et des archéomètres: amélioration de la fiabilité des datations archéomagnétiques. Les variations directionnelles du champ magnétique sont bien connues pour les deux derniers millénaires en France, mais les données de paléointensité sont trop sporadiques ou peu fiables pour permettre l'établissement d'une courbe de référence.

Nous avons donc cherché à acquérir de nouvelles données par l'étude de l'aimantation thermorémanente (ATR) des terres cuites archéologiques, en utilisant la méthode de Thellier. Nous nous sommes penchés sur les effets de l'atmosphère de chauffe, de l'anisotropie de l'ATR et des différences de vitesses de refroidissement. Vingt trois sites de 11 à 12 échantillons ont été analysés, deux ont été rejetés. Une précision de l'ordre de 5 à 10% de l'intensité estimée est atteinte et les résultats obtenus pour des âges proches sont cohérents.

Nous avons regroupé ces données avec celles publiées pour l'Europe de l'Ouest. Différents modes de traitements ont été appliqués pour préciser l'allure des variations d'intensité durant ces vingt derniers siècles. Durant l'Antiquité l'intensité du champ magnétique terrestre, 1.3 fois plus élevée qu'à l'actuel, aurait faiblement varié, atteignant un maximum vers 200 à 300 ap. J.C.; depuis la fin du Moyen-Age, elle aurait décru assez régulièrement, avec des valeurs variant de 65 à 50 $\mu$ T.

L'amplitude de ces variations, bien que faible comparée à la précision des estimations, montre que la connaissance de la paléointensité enregistrée par les terres cuites pourrait permettre de préciser la datation archéomagnétique de celles-ci.

## Mots clés:

Archéomagnétisme, Anisotropie d'aimantation, Paléointensité, Variation séculaire, Datation.